

Б. З. Михлин

Высокочастотные емкостные и индуктивные датчики

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 375

Б. З. МИХЛИН

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЕМКОСТНЫЕ И ИНДУКТИВНЫЕ ДАТЧИКИ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1960 ЛЕНИНГРАД

В брошюре приведены наиболее важные сведения о высокочастотных емкостных и основанных на использовании вихревых токов индуктивных датчиках, применяемых для измерения неэлектрических величин.

Даны основные формулы для расчета характеристик этих датчиков и рассмотрены наиболее распространенные измерительные схемы для определения их электрических параметров. Приведены схемы ряда радиоэлектронных приборов с высокочастотными емкостными и индуктивными датчиками.

Брошюра предназначается для подготовленных радиолюбителей, интересующихся радиоэлектронными приборами для измерения неэлектрических величин.

Михлин Берка Зусьевич

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЕМКОСТНЫЕ И ИНДУКТИВНЫЕ ДАТЧИКИ

Редактор *С. Г. Даревский* Техн. редактор *Н. И. Борунов*

Сдано в набор 14/VI 1960 г. Подписано к печати 26/VII 1960 г.
Т-10125 Бумага $84 \times 108^1/_{32}$ 2,71 печ. л. Уч.-изд. л. 4.
Тираж 45 000 экз. Цена 1 р. 60 к. (с 1 января 1961 г. цена 16 к.) Зак. 2317

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Радиоэлектронные методы измерения неэлектрических величин приобрели в последнее время большое практическое значение. Использование этих методов для построения измерительной аппаратуры различного назначения позволило решить многие актуальные задачи производственного контроля и автоматики, а также выполнить ряд важнейших научных исследований.

Применение радиоэлектронных методов для измерения неэлектрических величин непрерывно расширяется, что в свою очередь обусловливает бурное развитие рассматриваемой области измерительной техники.

Это развитие идет как по пути более широкого внедрения элементов радиоэлектроники для увеличения чувствительности и улучшения других качественных показателей приборов, так и по пути непосредственного использования радиотехнических процессов для измерительных целей. Весьма широко используются, в частности, закономерности распределения электромагнитных полей в проводниках и диэлектриках для измерения различных неэлектрических величин как в лабораторных, так и в производственных условиях.

В качестве датчиков, обеспечивающих использование указанных закономерностей в измерительных устройствах, в настоящее время находят применение как элементы радиотехнических цепей с сосредоточенными параметрами (колебательный контур, емкость, индуктивность, активное сопротивление и т. п.), так и элементы указанных цепей с распределенными параметрами (линия, волновод и пр.).

В радиоэлектронных приборах для измерения неэлектрических величин наибольшее распространение получили емкостные и индуктивные датчики, питаемые током высокой частоты. Такие датчики уместно назвать высокочастотными.

Высокочастотные емкостные датчики обычно представляют собой конденсаторы относительно малой емкости, конструктивно выполняемые в форме, наиболее приемлемой для осуществления измерений заданной неэлектрической величины.

Высокочастотные индуктивные датчики выполняются, как правило, в виде обмоток, помещаемых вблизи проводящих поверхностей контролируемых изделий или материалов.

В соответствии с принципом действия высокочастотных емкостных и индуктивных датчиков измерения с их помощью могут быть осуществлены бесконтактным способом, т. е. без соприкосновения датчика с объектом измерений. Это особенно важно, например, при необходимости производить контроль быстродвижущихся деталей, лент, транспортируемых веществ и т. п., а также в случае, когда недопустимо какое-либо механическое воздействие измерительного устройства на контролируемый объект.

Высокочастотные емкостные и индуктивные датчики обладают рядом других существенных достоинств, которые рассматриваются ниже в соответствующих главах данной брошюры.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ

ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Как известно, емкость плоскопараллельного конденсатора может быть определена из следующего соотношения

$$C = 0{,}089\,\frac{S\varepsilon}{d}, \qquad (1)$$

где C — емкость конденсатора, *пф*;
S — площадь обкладки конденсатора, *см*^{2};
d — расстояние между обкладками, *см*;
ε — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика конденсатора (для воздуха можно принять $\varepsilon = 1$).

Из соотношения (1) видно, что если контролируемая неэлектрическая величина воздействует на какой-либо параметр рассматриваемого конденсатора (S, d или ε), то емкость его будет изменяться в соответствии с увеличением или уменьшением контролируемой величины.

Это значит, что по емкости плоскопараллельного конденсатора можно судить о значении контролируемой величины, если предварительно расчетным путем или экспериментально установить связь между этой величиной и указанными параметрами конденсатора.

Из изложенного следует, что плоскопараллельный конденсатор может быть использован в качестве емкостного датчика для измерения тех неэлектрических величин, которые воздействуют на один или несколько его параметров (S, d или ε).

Аналогично емкости конденсатора рассмотренной формы емкость конденсатора любой другой формы определяется геометрическими размерами и взаимным расположением его обкладок, а также диэлектрической проницаемостью находящегося между ними диэлектрика.

Это дает возможность использовать в качестве емкостных датчиков конденсаторы наиболее удобной для каждой конкретной задачи формы, а также конденсаторы с различными диэлектриками.

В ряде случаев для измерений используется также зависимость потерь в диэлектрике конденсатора от контролируемой неэлектрической величины.

Емкостные датчики обладают рядом существенных достоинств. Главные из них следующие: высокая чувствительность, простота устройства, малые габариты и вес, малая инерционность, весьма небольшие усилия электрического взаимодействия между обкладками датчика.

Высокая чувствительность емкостных датчиков обусловливается тем, что надлежащим подбором их параметров представляется возможным получить значительные изменения емкости датчиков при заданном изменении контролируемой величины.

Простота устройства рассматриваемых датчиков, связанная с сущностью их работы, дает возможность выполнять их весьма малых габаритов и веса.

Малая инерционность — достоинство исключительно важное для контроля быстропеременных процессов — достигается за счет возможности использования элементов датчиков с соответствующими механическими параметрами, а также питания емкостных датчиков током высокой частоты.

Небольшие усилия электрического взаимодействия между обкладками конденсатора дают возможность использовать емкостные датчики для контроля перемещений деталей весьма маломощных механизмов.

Емкостным датчикам присущи и некоторые недостатки, ограничивающие их применение. К наиболее существенным недостаткам следует отнести: непостоянство характеристики при значительных изменениях условий их работы (температуры и влажности внешней среды и др.), необходимость использования для включения датчиков относительно сложных измерительных схем, а также требование точного изготовления в некоторых случаях отдельных деталей датчиков.

ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ

Благодаря своим достоинствам, отмеченным выше, емкостные датчики нашли применение во многих областях измерительной техники. Рис. 1 и 2 иллюстрируют наиболее

характерные случаи использования рассмотренных датчиков для целей контроля различных неэлектрических величин.

Рис. 1 относится к датчикам, осуществляющим преобразование контролируемой неэлектрической величины

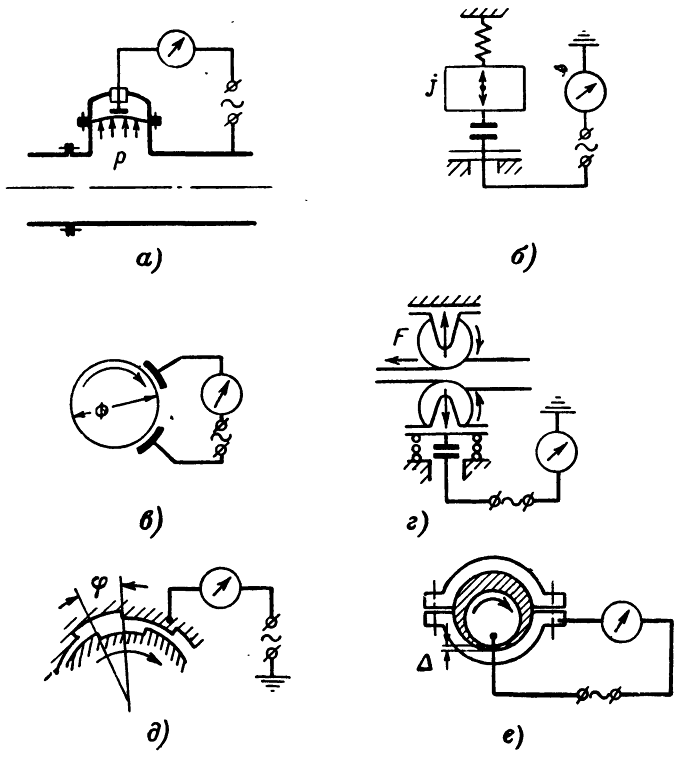


Рис. 1. Емкостные датчики с изменением зазора или рабочей площади обкладок.

а — для измерения давления; *б* — для определения вибраций; *в* — для контроля диаметра валов; *г* — для измерения давления на валки; *д* — для определения угла поворота; *е* — для измерения толщины масляной пленки в подшипниках.

в емкость за счет изменения зазора между обкладками или их рабочей площади, а рис. 2 — к датчикам, осуществляющим указанное преобразование за счет изменения диэлектрической проницаемости диэлектрика или потерь в нем.

Рис. 1,*а* дает представление об устройстве датчика для измерения давления в трубопроводе. Мембрана, встроен-

ная в датчик и являющаяся одной из обкладок конденсатора, прогибается в зависимости от величины давления, что приводит к соответствующему увеличению емкости датчика. Измеряя эту емкость, можно, очевидно, определить и давление в трубопроводе.

На рис. 1,*б* изображена схема емкостного датчика для измерения вибраций. Вибрации определяются по перемещению массы, подвешенной на пружине. Масса жестко связана с одной из обкладок конденсатора, вторая обкладка которого неподвижна. Перемещение массы фиксируется по изменению емкости конденсатора.

На рис. 1,*в* схематически показано устройство датчика для контроля диаметра вала в процессе его шлифования. Вал вращается вокруг оси, жестко закрепленной относительно корпуса станка. Электроды датчика также жестко укреплены на изоляторах, связанных с корпусом. При изменении диаметра вала изменяется зазор между телом вала и этими электродами, в результате чего соответственно изменяется емкость датчика. Заданному номинальному размеру вала соответствует вполне определенная емкость датчика.

На рис. 1,*г* показано устройство емкостного датчика для измерения усилий валков на прокатываемый металл. Подшипники нижнего валка опираются на мощные пружины, которые сжимаются под воздействием измеряемого усилия. Сжатие пружин определяется по изменению емкости датчиков, установленных под подшипниками валка.

Рис. 1,*д* иллюстрирует устройство емкостного датчика с гребенчатым статором и ротором для определения угла относительного их поворота. Емкость такого датчика зависит от степени перекрытия показанных на этом рисунке выступов. Так как это перекрытие зависит от угла поворота ротора относительно статора, то по значению емкости датчика можно судить о величине этого угла.

Схема емкостного датчика для измерения толщины масляной пленки в подшипниках изображена на рис. 1,*е*. При изменении толщины пленки масла под осью существенно изменяется емкость конденсатора, обкладками которого являются ось и корпус подшипника. Значение этой емкости при малом изменении диэлектрической проницаемости масла от нагрева подшипников с достаточной точностью характеризует толщину контролируемой пленки.

На рис. 2,*а* дана схема устройства датчика для измерения толщины ленты из диэлектрика. При изменении тол-

щины ленты на некоторую величину на эту же величину воздушный зазор замещается материалом ленты, имеющим бо́льшую, чем воздух, диэлектрическую проницаемость. Это, естественно, приводит к изменению емкости датчика.

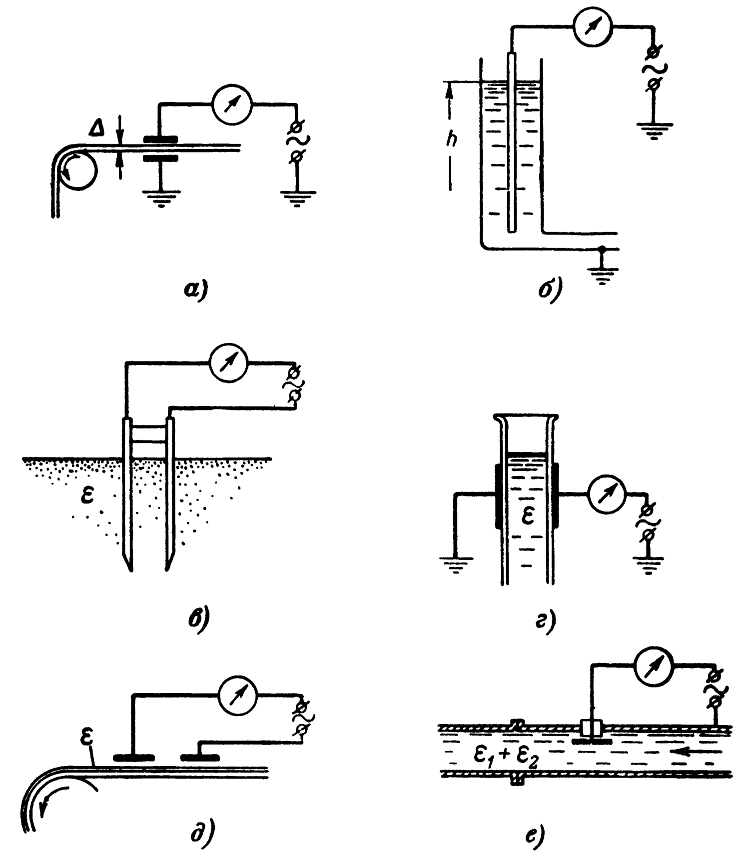


Рис. 2. Емкостные датчики с изменением диэлектрической проницаемости диэлектрика.

а — для измерения толщины ленты из диэлектрика; *б* — для измерения уровня жидкости; *в* — для определения влажности сыпучих тел; *г* — для определения концентрации растворов; *д* — для определения влажности бумаги; *е* — для контроля состава смеси двух жидкостей.

Измерив это изменение емкости, можно определить изменение толщины ленты.

Изображенная на рис. 2,*б* схема емкостного датчика дает возможность измерить уровень жидкости в баке, со-

общающемся с корпусом датчика. Как ясно из приведенной схемы, при изменении уровня жидкости изменяется емкость конденсатора, электродами которого являются проводящий корпус датчика и металлический стержень. Поэтому мерой уровня жидкости может служить емкость этого датчика.

На рис. 2,*в* показано устройство емкостного датчика для определения влажности сыпучих материалов. Два ножа, являющиеся обкладками конденсатора, погружаются в контролируемый материал на определенную глубину. В зависимости от влажности этого материала изменяются диэлектрическая проницаемость диэлектрика конденсатора и соответственно его емкость. Произведя предварительную тарировку датчика, можно по его емкости определить контролируемую влажность.

Приведенная на рис. 2,*г* схема дает представление об устройстве емкостной ячейки для высокочастотного титрования, т. е. для определения концентрации растворов. Ячейка обычно представляет собой конденсатор, обкладки которого охватывают стеклянную трубку с исследуемым раствором. Полное сопротивление ячейки изменяется скачком при добавлении к указанному раствору определенного количества реактива, дающего необходимую реакцию. Это открывает возможность, определяя количество добавляемого реактива и фиксируя момент упомянутого скачка радиотехническими средствами, с достаточной точностью установить концентрацию исследуемого раствора.

На рис. 2,*д* показана схема датчика для определения влажности бумаги, проходящей непрерывно под электродами емкостного датчика. Работа этого датчика основана на значительном изменении диэлектрической проницаемости бумаги при ее увлажнении.

На рис. 2,*е* показано устройство датчика для определения состава смеси из двух непроводящих жидкостей, диэлектрическая проницаемость которых различна. При изменении соотношения объемов жидкостей в смеси изменится эквивалентная диэлектрическая проницаемость диэлектрика конденсатора, один из электродов которого изолирован от металлической трубы, являющейся вторым электродом. В соответствии с изменением указанного соотношения изменяется емкость датчика, измеряя которую можно контролировать и состав смеси.

Указанные выше примеры охватывают, естественно, лишь часть случаев использования емкостных датчиков.

Они применяются также для определения толщины изоляции проводов, диаметра тонких проволок, перемещения деталей в малодоступных местах двигателей, для измерения давлений песка и подобных ему сыпучих тел, а также во многих других случаях.

ОСОБЕННОСТИ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ

Питание датчиков, имеющих небольшую емкость, осуществляется, как правило, от источников напряжения высокой частоты. Это вызвано тем, что только при использовании для питания этих датчиков токов высокой частоты реализуется их высокая чувствительность и обеспечивается стабильная работа связанных с ними измерительных схем.

При питании емкостных датчиков током низкой частоты их внутреннее сопротивление становится весьма большим. Поэтому для обеспечения достаточной чувствительности и стабильности измерений сопротивление изоляции элементов датчика и входных цепей измерительных схем должно быть чрезвычайно высоким.

Так, например, реактивное сопротивление датчика емкостью 20 *пф* при питании его током, имеющим частоту 50 *гц*, как легко подсчитать, равно около $2 \cdot 10^8$ *ом*. Поэтому сопротивление изоляции датчика и указанных входных цепей должно составлять по меньшей мере 10^{10} *ом*. Обеспечить такое сопротивление изоляции без специальных мероприятий чрезвычайно трудно, так как на величине этого сопротивления существенно сказываются изменение сопротивления изоляции при изменениях влажности и температуры внешней среды, непостоянство сопротивления сеточных цепей ламп и другие причины.

Повышать частоту тока, питающего емкостные датчики, в некоторых случаях приходится и потому, что для измерения быстро протекающих процессов необходимо осуществлять модуляцию несущей частоты, т. е. частоты питающего датчик тока. Так, например, если желательно с помощью емкостного датчика фиксировать изменение неэлектрической величины с частотой 50 *кгц*, то частота питающего датчик тока не должна быть меньше 400—500 *кгц*.

При выборе величины напряжения питания емкостных датчиков необходимо учитывать возможность пробоя воздушного промежутка или диэлектрика, находящихся между его электродами. Для воздушного промежутка, как по-

казывает опыт, не следует брать напряженность больше 10^3 *в/мм*. При наличии диэлектрика между обкладками, например слюды, эта напряженность может быть повышена в несколько раз.

Прокладка диэлектрика между электродами датчика не только уменьшает возможность пробоя, но и увеличивает относительное изменение емкости датчика при одном и том же изменении зазора между его электродами или действующей площади этих электродов.

При относительно небольших изменениях внешних условий характеристики емкостных датчиков достаточно стабильны. Однако если эти условия изменяются значительно, стабильность их характеристик существенно падает. Так, при колебаниях температуры внешней среды на 20—30° С характеристики емкостных датчиков в большинстве случаев можно считать неизменными. При колебаниях этой температуры в бóльших пределах с их влиянием, как правило, не считаться нельзя, так как изменение зазора между электродами датчика, а также изменение диэлектрической проницаемости его диэлектриков или материала контролируемого изделия могут существенно исказить результаты измерений.

Для исключения погрешностей от изменения температуры внешней среды детали датчика в ряде случаев изготовляют из инвара (сплава с ничтожно малым коэффициентом линейного расширения) или применяют детали из различных металлов в таком сочетании, чтобы был равен нулю общий эквивалентный температурный коэффициент расширения участка между обкладками. Этот коэффициент может быть вычислен по размерам деталей датчика и коэффициентам линейного расширения их материалов.

Погрешности от влияния колебаний температуры внешней среды на диэлектрическую проницаемость диэлектрика или контролируемого материала исключаются введением необходимых поправок или специальных дифференциальных схем измерения, описанных в гл. 3.

Для обеспечения высокой точности измерений с помощью емкостных датчиков необходимо исключить возможность попадания между их электродами влаги, масла и других веществ. Также важно, чтобы на поверхности изделий, диэлектрические параметры которых контролируются посредством емкостных датчиков, не было проводников или диэлекртиков, искажающих результаты измерений. Во многих случаях емкостные датчики могут быть сделаны

герметичными, что исключает попадание между их обкладками каких-либо веществ, влияющих на результаты измерений.

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК НЕКОТОРЫХ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ

Основными характеристиками емкостных датчиков являются их функция преобразования, т. е. зависимость емкости от контролируемой величины, и их чувствительность. Ниже приводятся относительно простые формулы, дающие возможность для наиболее часто встречающихся в практике емкостных датчиков рассчитать их основные характеристики.

Плоскопараллельный датчик для измерения смещений. Как следует из соотношения (1), при $\varepsilon=1$ функция преобразования для рассматриваемого датчика имеет вид:

$$C = 0{,}089 \frac{S}{d-\delta}, \quad (2)$$

где C — емкость датчика, *пф*;

δ — величина смещения, численно равная изменению зазора между электродами датчика δ_C (рис. 3), *см*;

d — зазор между электродами датчика при $\delta=0$, *см*;

S — площадь обкладок, *см*^{2}.

Чувствительность плоскопараллельного датчика для измерения смещений может быть легко определена из выражения (2), если найти приращение емкости датчика при изменении смещения на единицу длины [1]:

$$\xi = 0{,}089 \frac{S}{(d-\delta)^2}, \quad (3)$$

где ξ — чувствительность датчика, *пф/см*.

Как видно из полученной зависимости, чувствительность плоскопараллельного датчика не остается постоянной при различном зазоре между электродами датчика. Она существенно уменьшается с увеличением этого зазора. Поэтому надо стремиться по возможности уменьшать зазор между электродами датчика. Однако при малом зазоре чувстви-

---

[1] Указанное приращение может быть определено дифференцированием выражения (2) по δ. В общем случае чувствительность датчика определяется дифференцированием его функции преобразования по измеряемой величине.

тельность датчика будет резко изменяться. При необходимости сохранить чувствительность постоянной с точностью, большей, чем 10%, во всем диапазоне измеряемых смещений следует зазор выбирать таким, чтобы он был не менее чем в 20 раз больше максимальной величины смещения.

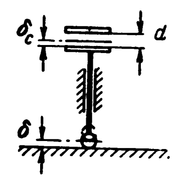


Рис. 3. К расчету характеристик емкостного датчика для измерения смещений.

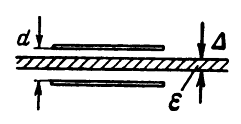


Рис. 4. К расчету характеристик емкостного датчика для измерения толщины ленты.

Плоскопараллельный датчик для измерения толщины ленты. Емкость этого датчика может быть определена как емкость конденсатора с двухслойным диэлектриком: один слой — сумма воздушных зазоров между обкладками и лентой, второй — контролируемая лента (рис. 4). Емкость такого конденсатора подсчитывается по известной формуле:

$$C = 0{,}089 \frac{S}{d' - \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)\Delta}, \quad (4)$$

где C — емкость датчика, *пф*;

d — зазор между обкладками, *см*;

Δ — толщина ленты, *см*;

ε — относительная диэлектрическая проницаемость материала ленты;

S — площадь обкладок, *см*^{2}.

Чувствительность датчика, как следует из выражения (4),

$$\xi = 0{,}089 \frac{S\left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)}{\left[d - \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)\Delta\right]^2}, \quad (5)$$

где ξ — чувствительность датчика, *пф/см*.

Из этого выражения следует, что чем выше диэлектрическая проницаемость материала ленты, тем чувствитель-

нее датчик. В рассматриваемом датчике, как и в датчике смещений, для увеличения чувствительности необходимо по возможности уменьшать расстояние между его электродами.

Плоскопараллельный датчик для определения влажности сыпучих материалов. Емкость такого датчика можно оценить с помощью зависимости (1), если учесть диэлектрическую проницаемость влажного материала.

Диэлектрическая проницаемость этого материала $\varepsilon_с$ может быть подсчитана по следующей формуле:

$$\varepsilon_с = \varepsilon\left(1 + \frac{\varepsilon_в - \varepsilon}{a\varepsilon_в + b\varepsilon} \cdot \frac{\gamma}{\gamma_в} \cdot \frac{\eta}{100}\right), \tag{6}$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость сухого материала;

γ — плотность вещества;

$\varepsilon_в$ — относительная диэлектрическая проницаемость воды ($\varepsilon_в = 80$);

$\gamma_в$ — плотность воды;

η — влажность материала %;

a, b — постоянные коэффициенты (для большинства смесей $a = 0{,}01 - 0{,}03$, $b = 0{,}5 - 1{,}5$).

Учитывая выражения (1) и (6), можно вычислить чувствительность датчика:

$$\xi = 0{,}089 \frac{S}{d} \varepsilon\left(1 + \frac{\varepsilon_в - \varepsilon}{a\varepsilon_в + b\varepsilon} \frac{\gamma}{\gamma_в}\right), \tag{7}$$

где ξ — чувствительность датчика, *пф*/%.

Как непосредственно следует из полученного результата, чувствительность рассматриваемого датчика растет с увеличением диэлектрической проницаемости и плотности вещества.

Цилиндрический датчик для измерения перемещений. Емкость цилиндрического датчика для измерения перемещений (рис. 5) можно вычислить с достаточной точностью по формуле для определения емкости цилиндрического конденсатора:

$$C = 0{,}56 \frac{l}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \tag{8}$$

где C — емкость датчика, *пф*;
l — длина перекрываемой части обкладок конденсатора, *см*;
d_1, d_2 — соответственно диаметры внутренней и внешней обкладок конденсатора.

Чувствительность этого датчика, определяемая из выражения (8),

$$\xi = 0{,}56 \frac{1}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \qquad (9)$$

где ξ — чувствительность датчика, *пф/см*.

Как ясно из полученного соотношения, чувствительность рассмотренного датчика по перемещению вдоль оси его цилиндрических электродов постоянна. В связи с этим применение этого датчика представляет большие удобства при необходимости измерять перемещения с высокой точностью в широком диапазоне их изменений.

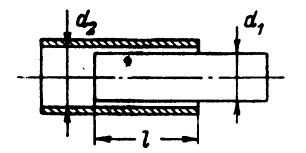


Рис. 5. К расчету характеристик емкостного датчика для измерения перемещений.

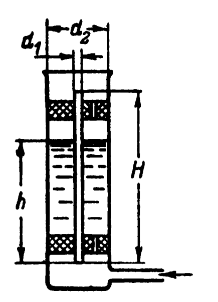


Рис. 6. К расчету характеристик емкостного датчика для измерения уровня жидкости.

Характеристики цилиндрического датчика для измерения уровня жидкости. Расчет характеристик этого датчика (рис. 6) можно произвести достаточно просто, если учесть, что его емкость слагается из емкости цилиндрического конденсатора (имеющего высоту $H—h$) без жидкости и параллельно включенной емкости цилиндрического конденсатора (имеющего длину h) с жидкостью.

Суммарная емкость этих конденсаторов

$$C = 0{,}6 \frac{1}{\ln \frac{d_2}{d_1}} [H + (\varepsilon - 1) h], \qquad (10)$$

где C — емкость конденсаторов, *пф*;
H — высота электрода датчика, *см*;
h — высота уровня жидкости, *см*;
ε — относительная диэлектрическая проницаемость жидкости;
d_2, d_1 — соответственно диаметры внешнего и внутреннего электродов датчика.

Чувствительность датчика в соответствии с выражением (10)

$$\xi = 0{,}56 \frac{1}{\ln \frac{d_2}{d_1}} (\varepsilon - 1), \qquad (11)$$

где ξ — чувствительность датчика, *пф/см*.

Полученные зависимости показывают, что емкость и чувствительность указанного выше датчика возрастают не только с уменьшением отношения диаметров электродов, но и с увеличением диэлектрической проницаемости жидкости.

Приведенные выше расчетные формулы дают возможность с определенной точностью, удовлетворительной для практических целей, оценить основные характеристики рассмотренных датчиков. Для более точного определения их функции преобразования и чувствительности необходимо, как правило, производить тарировку датчика, т. е., изменяя контролируемую величину, определить соответствующее ей значение емкости датчиков. Наиболее удобно производить тарировку датчиков по выходному сигналу измерительной схемы, в которую он включается. Основные измерительные схемы, работающие обычно с емкостными и другими высокочастотными датчиками, описаны в гл. 3.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ИНДУКТИВНЫЕ ДАТЧИКИ

ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Если вблизи обмотки, питаемой переменным током, находится проводящее тело, то в нем, как известно, возникают вихревые токи. За счет этих токов изменяются электрические параметры обмотки: уменьшаются как ее добротность, так и индуктивность.

Уменьшение добротности обмотки обусловлено возрастанием потерь за счет затраты мощности на создание вихревых токов, а уменьшение индуктивности — наличием магнитного поля вихревых токов, направленного всегда противоположно создающему их полю.

Изменение электрических параметров обмотки, питаемой переменным током, зависит при данной частоте тока от геометрических размеров и проводимости тела, находящегося вблизи обмотки, а также относительного расположения обмотки и проводящего тела.

Большое число неэлектрических величин, характеризуемых этими факторами, может быть определено по результатам измерений добротности или индуктивности обмотки, магнитное поле которой создает вихревые токи в контролируемых проводящих телах.

Построенные на этом принципе высокочастотные индуктивные датчики имеют ряд значительных достоинств. К ним следует отнести, кроме достоинств, отмеченных для емкостных датчиков, широкую возможность выбором частоты питающего тока увеличивать чувствительность датчика к определенной контролируемой величине и уменьшать ее по отношению к другим величинам, действующим на датчик. Так, например, при выборе надлежащей частоты питающего тока удается увеличить чувствительность датчика к перемещениям относительно подводящей пластинки и уменьшить ее к проводимости материала этой пластинки.

Высокочастотным индуктивным датчикам присущи и некоторые существенные недостатки. Например, в некоторых случаях характеристики рассматриваемых датчиков в значительно большей степени, чем емкостных, зависят от температуры внешней среды.

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИНДУКТИВНЫХ ДАТЧИКОВ

Высокочастотные индуктивные датчики в настоящее время применяются для решения многих задач измерительной техники, особенно в тех случаях, когда необходимо осуществить бесконтактный контроль проводящих сред. На рис. 7 приведены некоторые важные случаи применения высокочастотных индуктивных датчиков..

Рис. 7,*а* дает представление об устройстве датчика для контроля диаметра проводов, проходящих внутри его об-

мотки. При увеличении диаметра провода уменьшаются индуктивность и добротность обмотки датчика. Определяя величину индуктивности или добротности указанной обмотки, можно контролировать диаметр провода.

На рис. 7,*б* схематически показано устройство датчика для измерения толщины фольги цветных материалов

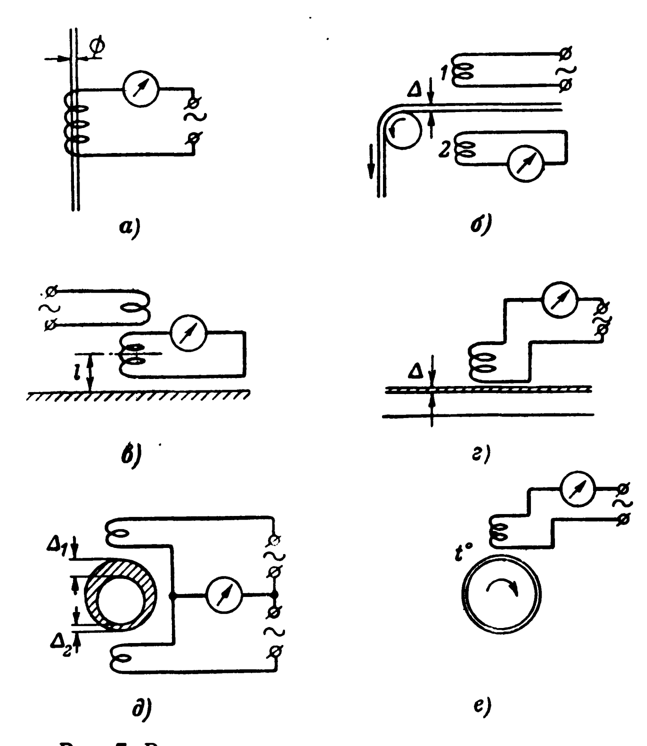


Рис. 7. Высокочастотные индуктивные датчики.

а — для контроля диаметра проводов; *б* — для измерения толщины фольги; *в* — для измерения смещений; *г* — для контроля толщины гальванических покрытий; *д* — для измерения разностенности труб; *е* — для определения температуры вращающихся деталей.

в процессе ее прокатки. При увеличении толщины фольги растет поле вихревых токов, направленное против поля тока возбуждающей обмотки датчика *1*. В результате этого увеличивается экранирующее действие контролируемой фольги и э. д. с., индуктируемая в воспринимающей обмотке датчика *2*, уменьшается. Изменение этой э. д. с. служит показателем изменения толщины фольги.

Рис. 7,*в* поясняет сущность работы датчика для измерения смещений относительно проводящей поверхности. При перемещении датчика относительно этой поверхности э. д. с. его воспринимающей обмотки изменяется, так как за счет увеличения или уменьшения вихревых токов в проводящем теле изменяется магнитный поток, охватывающий указанную обмотку датчика. Мерой изменения расстояния от датчика до проводящей поверхности служит изменение э. д. с. воспринимающей обмотки.

На рис. 7,*г* схематически изображен датчик для контроля толщины гальванических покрытий. При изменении толщины этого покрытия, отличающегося по проводимости от проводимости основания, изменяются электрические параметры обмотки датчика, устанавливаемого на поверхности покрытия. Это дает возможность, произведя соответствующую тарировку датчика, определять толщину контролируемого гальванического покрытия.

Для измерения разностенности металлических труб может быть использована схема датчика, приведенная на рис. 7,*д*. Если обмотки датчика перемещать вокруг трубы, то при наличии разницы в толщине участков трубы, находящихся под обмотками датчиков, электрические параметры обмоток будут разными, что приведет к возникновению сигнала, пропорционального контролируемой разностенности.

Рис. 7,*е* иллюстрирует возможность использования рассматриваемых датчиков для бесконтактного определения температуры тонкостенных вращающихся металлических деталей. При изменении температуры детали (за счет изменения проводимости ее материала) изменяются электрические параметры обмотки датчика. Предварительной тарировкой можно установить однозначную связь между температурой детали и указанными параметрами датчика.

На рис. 8 показан ряд других важных случаев использования датчиков, основанных на действии вихревых токов.

На рис. 8,*а* приведен случай использования рассматриваемых датчиков для определения толщины металлических покрытий на ленте из диэлектрика, а на рис. 8,*б* — для контроля качества изделий по проводимости. Работа этих датчиков, как ясно из изложенного выше, основана на зависимости индуктивности и добротности обмотки датчика от контролируемой величины.

Рис. 8,*в* дает представление об устройстве датчика для сигнализации наличия металлических включений в мате-

риале, транспортируемом конвейером. При прохождении металлического тела вблизи обмотки датчика электрические параметры этой обмотки резко изменяются, в результате чего на выходе электронной схемы, в которую включен рассматриваемый датчик, возникает соответствующий сигнал.

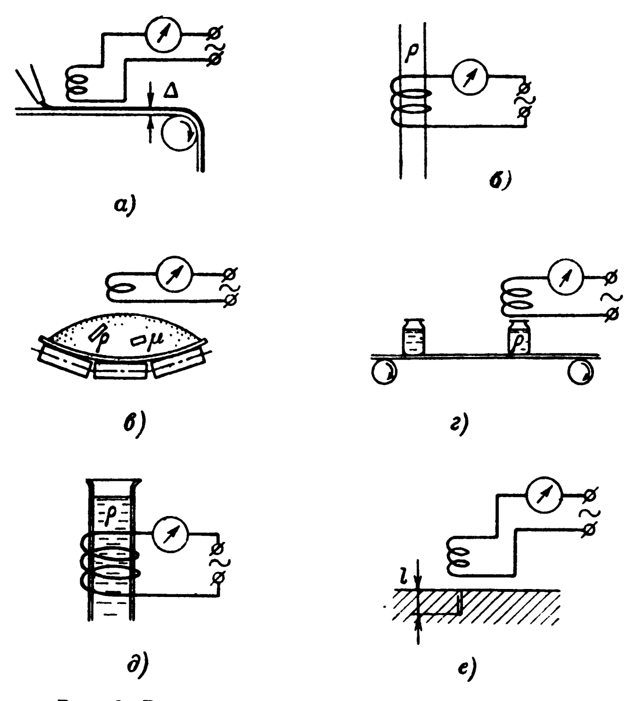


Рис. 8. Высокочастотные индуктивные датчики.

а — для определения толщины металлических покрытий на ленте из диэлектрика; *б* — для контроля качества изделий по проводимости; *в* — для сигнализации наличия металлических включений в материале, транспортируемом конвейером; *г* — для определения качества продуктов; *д* — для высокочастотного титрования; *е* — для обнаружения трещин в металлических деталях.

На рис. 8,*г* показана упрощенная схема датчика для определения качества некоторых консервированных продуктов, помещенных в тару из непроводящего материала. При изменении качества ряда продуктов изменяется их проводимость, что дает возможность контролировать эти продукты высокочастотными индуктивными датчиками.

На рис. 8,*д* дан схематический чертеж индуктивной ячейки для высокочастотного титрования, сущность кото-

рого была кратко изложена при рассмотрении рис. 2,*г*. При использовании индуктивной ячейки для высокочастотного титрования посредством электронной схемы устанавливается момент резкого изменения проводимости раствора.

Схема простейшего датчика для обнаружения трещин в металлических деталях приведена на рис. 8,*е*. При перемещении датчика по поверхности детали электрические параметры его обмотки в месте нахождения трещины резко изменяются. Это дает возможность с помощью рассматриваемых датчиков определять ничтожно малые (часто невидимые глазом) трещины в металлических деталях.

Число примеров использования высокочастотных индуктивных датчиков можно было бы значительно увеличить, однако и приведенные примеры в достаточной степени характеризуют большие возможности рассматриваемых датчиков.

ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИНДУКТИВНЫХ ДАТЧИКОВ

Возможность использований высокочастотных индуктивных датчиков определяется в значительной мере так называемым поверхностным эффектом, сущность которого заключается в том, что переменное магнитное поле и вызываемые им вихревые токи затухают по мере проникновения в глубь проводящей среды. Это затухание связано с тем, что вихревые токи, обусловленные переменным магнитным полем, в свою очередь создают магнитное поле, направленное противоположно вызвавшему их полю. Разность потоков возбуждающего поля и поля вихревых токов по мере проникновения в глубь проводящей среды уменьшается, в соответствии с чем уменьшается интенсивность вихревых токов.

Поверхностный эффект проявляется тем сильнее, чем выше частота тока, меньше удельное сопротивление проводящей среды и больше ее относительная магнитная проницаемость.

Для оценки степени затухания вихревых токов в проводящей среде обычно используется специальный критерий — эквивалентная глубина проникновения тока θ, который определяется следующим образом:

$$\theta = 50{,}3\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \qquad (12)$$

где θ — глубина проникновения тока, *см*;

ρ — удельное сопротивление проводящей среды, *ом·мм²/м*;

μ — относительная магнитная проницаемость этой среды;

f — частота тока, *гц*.

На рис. 9 приведены расчетные кривые, показывающие изменение плотности вихревых токов по мере проникновения в глубь проводящей среды для различных частот.

Как видно из этого рисунка, большей частоте соответствует более интенсивное затухание вихревых токов с увеличением расстояния от поверхности проводящей среды.

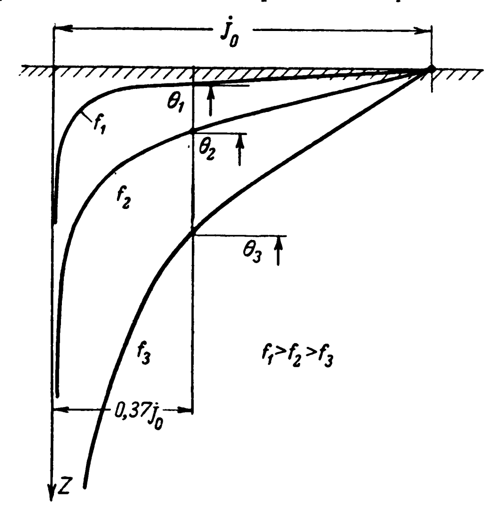


Рис. 9. Распределение вихревых токов в пластинке.

Увеличение частоты, как ясно из выражения (12), приводит к уменьшению глубины проникновения. Таким образом, с уменьшением значения θ более резко проявляется поверхностный эффект. Расчет показывает, что для проводящих пластин, имеющих толщину, в 8—10 раз бóльшую глубины проникновения, при $Z=\theta$ плотность вихревых токов составляет приблизительно 37% плотности на поверхности пластины j_0, а при $Z=3\theta$ — лишь 5% от j_0. Поэтому при толщине проводящей пластины, в несколько раз большей глубины проникновения, распределение вихревых токов определяется практически только значением θ. В соответствии с этим толщина пластины при указанных усло-

виях не сказывается на электрических параметрах индуктивного датчика, расположенного над пластиной.

Значение θ для определенной проводящей среды зависит только от частоты. В таблице приведены величины ρ и μ некоторых металлов и значения θ для них при различной частоте.

Глубина проникновения тока в различных металлах

f, *гц*	Глубина проникновения θ, *мм*			
	Медь $\rho=0,017$ *ом·мм²/м*, $\mu=1$	Алюминий $\rho=0,029$ *ом·мм²/м*, $\mu=1$	Сталь $\rho=0,139$ *ом·мм²/м*, $\mu=100$	Свинец $\rho=0,221$ *ом·мм²/м*, $\mu=1$
10^2	6,7	8,6	1,9	24
$6\cdot10^2$	2,7	3,5	0,77	9,8
10^3	2,1	2,7	0,60	7,6
$6\cdot10^3$	0,85	1,1	0,24	3,5
10^4	0,67	0,86	0,19	2,4
$6\cdot10^4$	0,27	0,35	0,077	0,98
10^5	0,21	0,27	0,060	0,76
10^6	0,067	0,086	0,019	0,24
10^7	0,021	0,027	0,006	0,076

Как видно из таблицы, глубина проникновения тока в металлы уже при частоте 10^3 *гц* весьма невелика. При увеличении частоты до 10^5 *гц* она становится ничтожной (например, для меди — 0,21 *мм*, для стали — 0,06 *мм*).

В тех случаях, когда используются высокочастотные индуктивные датчики, внутри которых помещаются контролируемые изделия, при учете влияния поверхностного эффекта необходимо принимать во внимание поперечные размеры изделия. Так, например при контроле цилиндрических изделий необходимо учитывать отношение радиуса поперечного сечения изделия к глубине проникновения тока в материал изделия при принятой частоте. Вычисления показывают, что чем больше это отношение, тем сильнее проявляется поверхностный эффект.

На рис. 10 в качестве примера показаны графики распределения вихревых токов по сечению круглого медного проводника диаметром 1 *мм* при различной частоте. Как видно из приведенных графиков, уже при частоте $f=10^5$ *гц*, т. е. при отношении радиуса сечения проводника к глубине проникновения $r/\theta=2,4$, даже в проводнике относительно малого диаметра резко проявляется поверхностный эффект. При частоте тока $f=10^6$ *гц*, т. е. при отношении $r/\theta=7,5$, этот эффект проявляется еще резче и распределение вихревых токов практически совпадает с рас-

смотренным выше распределением этих токов в пластине, для которой отношение ее толщины к глубине проникновения близко к величине 7,5.

Учет распределения вихревых токов в проводящих материалах имеет исключительно важное значение при использовании высокочастотных индуктивных датчиков, так как только при правильном учете этого распределения можно успешно осуществить необходимые измерения. Приведем несколько примеров.

Толщину фольги цветных металлов можно с достаточной точностью измерить датчиком, указанным на рис. 7,*б*,

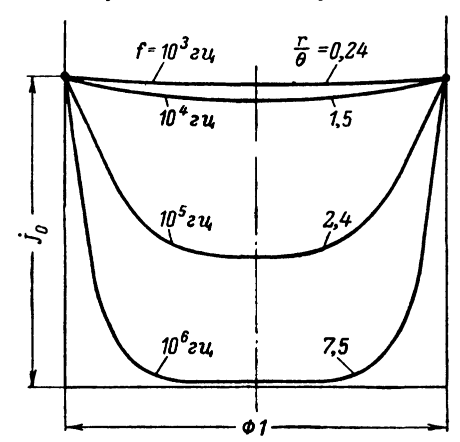


Рис. 10. Распределение вихревых токов по сечению круглого провода.

лишь в том случае, если глубина проникновения в материале фольги значительно больше ее толщины. Если, наоборот, толщина фольги значительно больше этой глубины проникновения, то измерения толщины фольги рассматриваемым способом осуществить не представляется возможным, так как вихревые токи сосредоточиваются на поверхности фольги, обращенной к возбуждающей обмотке датчика, и независимо от дальнейшего увеличения толщины фольги э. д. с. в воспринимающей обмотке датчика практически не изменяется.

Для измерения диаметра провода способом, проиллюстрированным на рис. 7,*а*, необходимо использовать частоту, при которой значение θ для материала провода значительно меньше его диаметра. В этом случае вихревые токи сосредоточиваются на поверхности провода и элек-

трические параметры датчика существенно зависят от диаметра провода и весьма мало от удельного сопротивления его материала.

При обнаружении трещин в металлических деталях датчиком дефектоскопа (рис. 8,*е*) частота тока, питающего датчик, должна быть выбрана такой, чтобы глубина проникновения была значительно больше возможной глубины трещин. Только в этом случае можно ожидать нормальной работы дефектоскопа.

Глубина проникновения определяется, как следует из сказанного выше, материалом, размерами, а также частотой тока, питающего датчик. Так как материал и размеры контролируемого изделия, как правило, задаются, то для обеспечения удовлетворительных условий работы высокочастотных индуктивных датчиков необходимо выбрать надлежащую частоту питающего их тока.

При выборе этой частоты следует учитывать не только важность обеспечения приемлемой глубины проникновения, но и ряд других требований (необходимость достижения оптимальной чувствительности, линейности шкалы прибора, малых габаритов датчика, максимального подавления помех и др.). Некоторые примеры, иллюстрирующие это положение, приводятся ниже, а также в гл. 3 и 4.

Для уменьшения габаритов индуктивных датчиков в некоторых случаях используются сердечники из материалов, имеющих значительную магнитную проницаемость. При низких частотах находят применение сердечники из специальной листовой стали, имеющей на этих частотах высокую магнитную проницаемость и относительно малые потери. При повышенных частотах применяются, как правило, ферриты, потери в которых, даже для высоких частот, относительно малы.

При применении в датчиках сердечников следует иметь в виду, что в связи с изменением магнитной проницаемости сталей и ферритов от температуры и других причин стабильность датчиков с сердечниками обычно существенно ниже стабильности датчиков без сердечников.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕКОТОРЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИНДУКТИВНЫХ ДАТЧИКОВ

Для высокочастотных индуктивных датчиков функциями преобразования являются зависимости, связывающие их индуктивность или добротность с измеряемой неэлектрической величиной. Эти зависимости вычисляются или

определяются экспериментально. Чувствительность рассматриваемых датчиков легко найти, определив изменение их индуктивности или добротности при изменении контролируемой неэлектрической величины на единицу.

Ниже приводятся расчетные формулы или графики, дающие возможность определить основные характеристики некоторых высокочастотных индуктивных датчиков, используемых в описанных в гл. 4 приборах.

Датчик для измерения диаметра проводов. В связи с трудностями определения функции преобразования этого

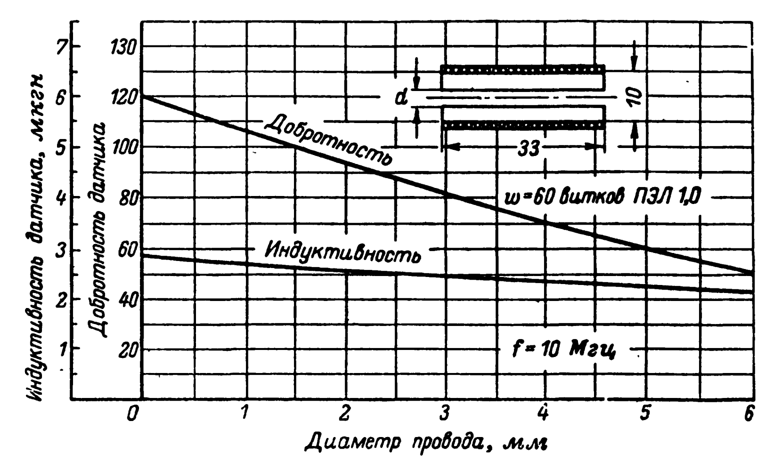


Рис. 11. Зависимость добротности и индуктивности обмотки датчика от диаметра контролируемого провода.

датчика аналитически зависимость индуктивности и добротности его обмотки для заданной частоты тока от диаметра провода обычно определяют экспериментально.

На рис. 11 приведены указанные зависимости для обмотки датчика электронного микрометра, предназначенного для измерения диаметра проводов из цветных металлов (данные обмотки указаны на этом же рисунке). Как видно из этих графиков, добротность и индуктивность обмотки датчика падают с увеличением диаметра провода. При этом для медных и алюминиевых проводов эти зависимости практически совпадают. Без большой погрешности эти же кривые могут быть приняты и для латунной проволоки.

Чувствительность рассматриваемых датчиков легко может быть определена по крутизне приведенных на рис. 11

зависимостей добротности или индуктивности обмотки от диаметра провода.

Датчик для измерения смещений относительно проводящей поверхности. Экспериментально полученная зависимость выходного напряжения воспринимающей обмотки этого датчика от смещения его относительно проводящей поверхности приведена на рис. 12. Там же указаны параметры обмоток этого датчика. Данные получены при настройке в резонанс воспринимающей обмотки на частоту тока возбуждения датчика. При частоте тока около 2 *Мгц*

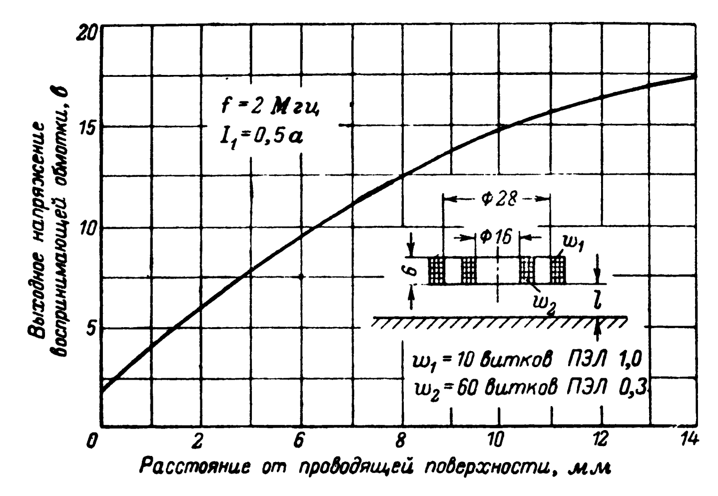


Рис. 12. Зависимость выходного напряжения датчика от его смещения относительно проводящей поверхности.

воспринимающая обмотка настраивается в резонанс за счет межвитковой емкости.

Для измерения перемещений могут быть использованы датчики с меньшим диаметром обмоток по сравнению с указанными выше, однако при этом заметно падает чувствительность датчика и в более узких пределах перемещений сохраняется ее постоянство. Исследования показывают, что чувствительность датчика сохраняется практически постоянной при перемещениях до расстояний, почти равных радиусу обмотки возбуждения.

При использовании рассматриваемых датчиков размеры проводящей пластинки должны быть такими, чтобы ближайший ее край находился на расстоянии не менее 1,5—2 радиусов возбуждающей обмотки.

Датчик для измерения толщины фольги цветных металлов. Электродвижущая сила, индуктируемая в воспринимающей обмотке датчика для измерения толщины фольги цветных металлов, может быть с достаточной точностью определена, как показывает расчет, из следующего соотношения:

$$E = E_0 \frac{k \frac{\rho}{lf\Delta}}{\sqrt{1 + \left(k \frac{\rho}{lf\Delta}\right)^2}}, \tag{13}$$

где E — э. д. с., наводимая в воспринимающей обмотке датчика, *в*;

E_0 — э. д. с., наводимая в воспринимающей обмотке датчика при отсутствии фольги между возбуждающей и воспринимающей обмотками, *в*;

Δ — толщина фольги, *см*;

ρ — удельное сопротивление материала фольги, *ом·мм²/м*;

f — частота тока, *гц*;

l — расстояние от фольги до центра возбуждающей обмотки, *см*;

$k = 3\,800$.

Чувствительность датчика ξ легко подсчитать из выражения (13), продифференцировав его правую часть:

$$\xi = E_0 \frac{k \frac{\rho}{lf\Delta}}{\Delta\left[\sqrt{1 + \left(k \frac{\rho}{lf\Delta}\right)^2}\right]^3}, \tag{14}$$

где ξ — чувствительность датчика, *в/см*.

Семейство кривых, построенное в соответствии с уравнением (14), приведено на рис. 13. Как видно из этого семейства, чувствительность рассматриваемого датчика существенно изменяется для различных толщин фольги и частоты тока возбуждения. Можно, однако, всегда выбрать оптимальную частоту, которая для заданного интервала контролируемых толщин дает наименьшее изменение чув-

ствительности. Эта частота $f_{опт}$, вычисленная по соотношению (14), может быть определена следующим образом:

$$f_{опт} = 3\,800 \frac{\rho}{l} \sqrt{\frac{\Delta_2^{2/3} - \Delta_1^{2/3}}{\Delta_2^2 \Delta_1^{2/3} - \Delta_1^2 \Delta_2^{2/3}}}, \qquad (15)$$

где $f_{опт}$ — оптимальная частота, *гц*;

Δ_1 и Δ_2 — крайние значения толщины фольги измеряемого интервала, *см*.

Из выражения (13) следует, что при изменении расстояния фольги от возбуждающей обмотки могут возникнуть заметные погрешности измерений. Эти погрешности, однако, могут быть существенно снижены за счет соответ-

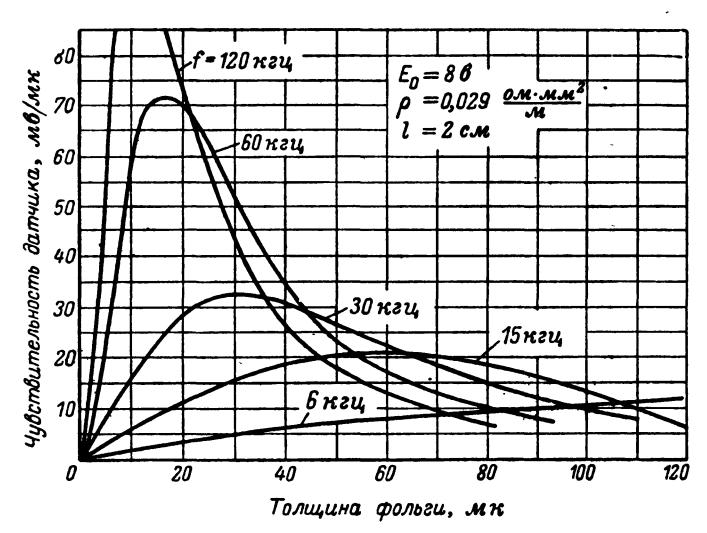


Рис. 13. Зависимость чувствительности датчика от толщины алюминиевой фольги и частоты тока возбуждения.

ствующей настройки измерительной схемы, сущность которой изложена в гл. 4.

Погрешности измерений могут возникнуть и при изменении температуры фольги, так как при этом изменяются ее удельное сопротивление и, как видно из выражения (13), э. д. с., наводимая в воспринимающей обмотке. Так, например, изменение на 10° С температуры алюминиевой фольги, имеющей температурный коэффициент удельного

сопротивления 0,004, приводит, очевидно, к изменению значения ρ на 4%. Вследствие этого возникает погрешность, равная почти 4% измеряемой толщины.

В связи с указанным для обеспечения измерений толщины фольги с достаточной точностью необходимо устанавливать датчик в месте с возможно более постоянной температурой фольги или же вводить при измерениях соответствующие поправки.

Полученные выше графики и расчетные формулы для некоторых высокочастотных индуктивных датчиков дают возможность с учетом коэффициентов преобразования измерительных схем, рассматриваемых в следующей главе, определить чувствительность, а также возможные погрешности измерений ряда радиоэлектронных приборов с этими датчиками.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ОСНОВНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ

ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ

Измерительные схемы устройств с рассматриваемыми высокочастотными датчиками, как и измерительные схемы всех радиоэлектронных устройств для измерения неэлектрических величин, предназначены для преобразования изменений электрических параметров датчиков в напряжение или ток, фиксируемые указателем.

Точность измерений, которая может быть достигнута радиоэлектронными устройствами, в значительной мере определяется стабильностью этого преобразования. Последняя зависит в большинстве случаев от постоянства характеристик элементов схемы, в частности стабильности емкости и индуктивности проводов, соединяющих датчик с остальными блоками прибора.

Стабильность электрических параметров соединительных проводов является исключительно существенной в том случае, когда необходимо помещать датчик на большом удалении от места установки других блоков прибора. При большой длине этих проводов велики их емкость и индуктивность, поэтому незначительные изменения последних (на доли процента) могут перекрыть изменения емкости или индуктивности датчика от заметных изменений контролируемых неэлектрических величин. Это особенно суще-

ственно для датчиков, обладающих малой чувствительностью.

Для оценки влияния возможных изменений соединительных, а также монтажных проводов на точность измерений приведем некоторые данные о их емкости и индуктивности.

Емкость скрученных изолированных проводов, используемых обычно для монтажа, 20—100 *пф/м*, а индуктивность 0,5—1 *мкгн/м*. Емкость экранированного провода 100—200 *пф/м*, а коаксиального (в зависимости от марки) 40—100 *пф/м*, индуктивность коаксиального кабеля обычно около 0,3 *мкгн/м*. Индуктивность двух проводников диаметром 1 *мм*, проходящих параллельно на расстоянии 40 *мм*, приблизительно равна 2 *мкгн/м*, а емкость их — около 10 *пф/м*. Проводник, проходящий на указанном расстоянии около металлического экрана, имеет индуктивность, приблизительно в 2 раза меньшую, а емкость — в 2 раза бóльшую указанных значений.

Приведенные данные показывают, что на точности измерений может сказаться не только изменение параметров соединительных проводов, но и перемещение проводов друг относительно друга, а также относительно корпуса прибора.

Длину соединительных проводов необходимо стремиться сделать как можно меньшей также и с целью уменьшения наводок за счет переменных электрических и магнитных полей.

В тех же случаях, когда по условиям использования прибора все же необходимо применять длинные соединительные провода, для повышения стабильности прибора используются специальные, более сложные схемы включения датчиков, о которых будет сказано ниже.

Измерительные схемы, работающие с высокочастотным датчиком, можно разбить на две большие группы.

К первой группе относятся схемы, в которых датчики входят в систему делителей напряжения. В этих схемах при изменении электрических параметров датчиков выходное напряжение части схемы изменяется за счет изменения полного сопротивления датчика. Регистрируя эти изменения, можно контролировать неэлектрические величины, действующие на датчик. Для обеспечения работы схем этой группы необходимо питать датчик от отдельного генератора высокой частоты со стабильным выходным напряжением.

Ко второй группе относятся схемы измерительных высокочастотных генераторов, элементом которых является используемый датчик. При изменении электрических параметров датчика, включенного в такую схему, изменяются частота или ток в элементах измерительного генератора; регистрируя эти изменения, можно контролировать соответствующую неэлектрическую величину.

К первой группе относятся рассматриваемые ниже дифференциальные и мостовые схемы, а ко второй — схемы с изменением амплитуды и частоты колебаний измерительных генераторов.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

На рис. 14 показана дифференциальная измерительная схема, в которую включен так называемый дифференциальный датчик. Этот датчик представляет собой два последовательно включенных конденсатора, имеющих общую среднюю обкладку. При перемещении этой обкладки в какую-

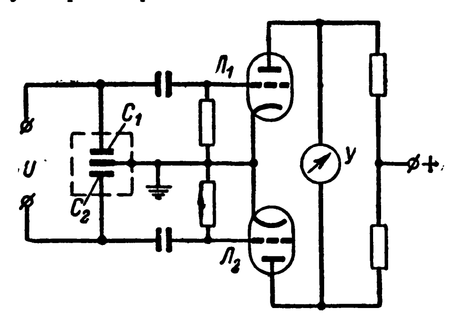


Рис. 14. Дифференциальная измерительная схема.

либо сторону емкость одного конденсатора возрастает, а другого — убывает.

Использование дифференциального датчика в рассматриваемой схеме обеспечивает увеличение чувствительности вдвое по сравнению с такой же схемой при применении обычного датчика, а также дает возможность получить линейную зависимость выходного напряжения схемы от перемещения средней обкладки в достаточно широких пределах.

В том случае, когда емкость конденсатора C_1 равна емкости конденсатора C_2 и, кроме того, одноименные элементы в сеточных цепях схемы одинаковы, напряжения,

подаваемые на сетки ламп $Л_1$ и $Л_2$, также одинаковы. При совпадении характеристик этих ламп и равенстве их анодных нагрузок в указателе $У$ ток отсутствует. При перемещении подвижной обкладки вверх емкость конденсатора C_1 увеличивается, а конденсатора C_2 — уменьшается. Это приводит к возрастанию напряжения на сетке лампы $Л_2$ и уменьшению его на сетке лампы $Л_1$, так как реактивное сопротивление конденсатора C_2 увеличивается, а конденсатора C_1 уменьшается. При перемещении указанной обкладки вниз, очевидно, напряжение увеличивается на сетке лампы $Л_1$. В результате этого стрелка указателя будет отклоняться влево или вправо в зависимости от того, вверх или вниз переместится средний электрод дифференциального датчика.

Часто используются дифференциальные схемы с настроенными в резонанс контурами, в один из которых входит емкость C_1, а в другой — C_2. Эти схемы отличаются значительной чувствительностью.

Разумеется, дифференциальные схемы могут быть использованы не только с емкостными, но и с индуктивными датчиками. В связи с симметрией этих схем они отличаются повышенной стабильностью, так как одновременное одинаковое изменение параметров одноименных их элементов, а также действие помех, одинаковое на обе половины схемы, не вызывают дополнительных погрешностей измерений.

Дифференциальные схемы с двумя идентичными датчиками нашли широкое применение для контроля изделий по образцу. В этом случае производится одновременное измерение контролируемого изделия и образца и определяется лишь разность воздействий изделия и образца на соответствующие датчики. Применение рассматриваемой измерительной схемы обеспечивает повышение точности измерений, так как одновременное одинаковое воздействие мешающих факторов на изделие и образец, а также на датчики не вызывает обычно существенных изменений показаний прибора.

Так, например, при контроле диаметра какого-либо металлического изделия высокочастотным индуктивным датчиком, включенным в дифференциальную измерительную схему, можно исключить влияние температуры внешней среды на точность измерений, если использовать в рассматриваемой схеме второй аналогичный датчик для контроля диаметра изделия, принятого за образец.

МОСТОВЫЕ СХЕМЫ

Наиболее простая мостовая схема для определения изменений емкости датчиков при наличии в них потерь приведена на рис. 15.

Равновесие этой мостовой схемы имеет место при соблюдении следующих двух условий:

$$C_1 r_3 = C_2 r_2 \text{ и } r_1 r_4 = r_2 r_3, \quad (16)$$

где C_1 — емкость датчика, а r_1 — сопротивление емкостного датчика, эквивалентное потерям в нем.

При $r_3 = r_4$, $r_1 = r_2 = r$, $C_1 = C_2 = C$ выходное напряжение мостовой схемы

$$u = \frac{U}{4} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega C r)^2}} \cdot \frac{\Delta C}{C}, \quad (17)$$

где U — напряжение питания моста;
ω — круговая частота этого напряжения;
C — емкость датчика;
ΔC — изменение емкости датчика.

Для определения изменений индуктивности датчиков часто используется мостовая схема, приведенная на рис. 16. Условия равновесия схемы следующие:

$$L_1 r_4 = L_2 r_3 \text{ и } r_1 r_4 = r_2 r_3, \quad (18)$$

где L_1 — индуктивность, а r_1 — сопротивление датчика с учетом влияния вихревых токов.

При $r_3 = r_4$, $r_1 = r_2 = r$, $L_1 = L_2 = L$ напряжение на измерительной диагонали моста

$$u = \frac{U}{4} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{\omega L}\right)^2}} \cdot \frac{\Delta L}{L}, \quad (19)$$

где ΔL — изменение индуктивности датчика под воздействием контролируемой неэлектрической величины.

В рассмотренных выше мостовых схемах целесообразно использовать дифференциальные датчики. Чувствительность схем в этом случае увеличивается вдвое по сравнению с чувствительностью, определяемой формулами (17) и (19).

При $\omega C r < 1$ и $\frac{r}{\omega L} < 1$, т. е. когда реактивное сопротивление датчика больше его активного сопротивления, что

обычно и имеет место, чувствительность измерений, как следует из выражений (17) и (19), тем больше, чем больше относительные изменения значений емкости и индуктивности при одном и том же изменении контролируемой величины. Поэтому необходимо параметры датчиков и входных цепей рассматриваемых измерительных схем выбирать всегда так, чтобы обеспечить максимальное относительное изменение емкости и индуктивности датчиков.

При необходимости удалить высокочастотный датчик на значительное расстояние от остальной схемы прибора следует стремиться к тому, чтобы все элементы мостовой схемы монтировались вблизи датчика. В этом случае изме-

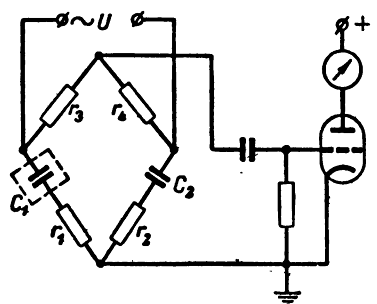


Рис. 15. Мостовая измерительная схема с емкостным датчиком.

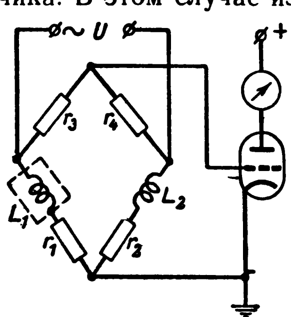


Рис. 16. Мостовая измерительная схема с индуктивным датчиком.

нение электрических параметров проводов, соединяющих мостовую схему с входом усилителя измерительной схемы, мало сказывается на точности измерений. Сказанное справедливо в случае, если малы наводки, которые возникают при близком расположении проводов, питающих мостовую схему, от проводов, идущих к усилителю.

При невозможности расположить указанные провода на значительном расстоянии друг от друга часто используется схема, приведенная на рис. 17. В этой схеме датчик *С* включается в мостовую схему посредством коаксиального кабеля *К* через согласующий трансформатор *Тр* или автотрансформатор. Соотношение витков их обмоток выбирается таким, чтобы волновое сопротивление кабеля и активное сопротивление резонансной системы, образованной датчиком и трансформатором или автотрансформатором, численно совпадали. В этом случае к мостовой схеме подключается чисто активное сопротивление и для

уравновешивания этой схемы достаточно подобрать величину омического сопротивления r в каком-либо плече моста.

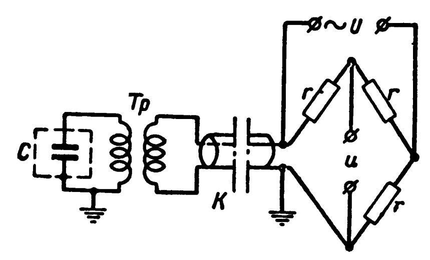


Рис. 17. Мостовая измерительная схема с емкостным датчиком, включенная через согласующий трансформатор.

Использование данной схемы дает возможность применить коаксиальный кабель большой протяженности, изменение длины которого мало сказывается на результате измерений.

СХЕМЫ С ИЗМЕНЕНИЕМ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

Для измерения малых изменений емкости, индуктивности или добротности высокочастотных датчиков часто используются схемы, основанные на зависимости анодного или сеточного тока лампы генератора от амплитуды генерируемых им колебаний. Режим работы генератора в этих схемах подбирается обычно таким, чтобы либо достигнуть в достаточно широких пределах линейной зависимости изменений анодного или сеточного тока от контролируемой неэлектрической величины, либо обеспечить срыв генерации при малом изменении параметров контура, в который включен датчик.

В первом случае изменение контролируемой величины можно определить по изменению анодного или сеточного тока генераторной лампы, а во втором — по изменению при восстановлении генерации емкости или индуктивности контура, в который включен датчик.

На рис. 18 приведена схема для определения изменения емкости датчика, включенного в сеточный контур генератора, по изменению анодного тока его лампы. При изменении емкости датчика нарушается первоначальная резо-

нансная настройка контура, в который входят емкость C_1 и индуктивность L_1. Это вызывает уменьшение амплитуды колебаний генератора, а следовательно, и отрицательного смещения на сетке генераторной лампы *Л*, что приводит к росту анодного тока этой лампы. В результате увеличи-

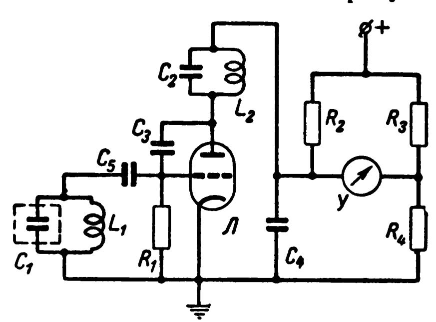


Рис. 18. Измерительная схема с датчиком, включенным в сеточный контур генератора.

вается падение напряжения на сопротивлении R_2 и в указателе *У* появляется ток, пропорциональный изменению емкости датчика.

Схема, приведенная на рис. 19, отличается от предыдущей тем, что уменьшение амплитуды колебаний генератора

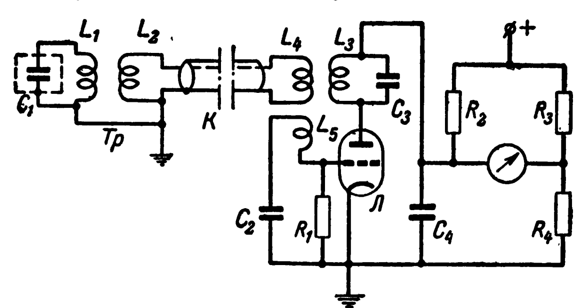


Рис. 19. Измерительная схема с датчиком, включенным в анодный контур генератора.

и в связи с этим отрицательного смещения на сетке генераторной лампы происходит за счет изменения потерь в контуре L_1C_1, связанном с анодным контуром генератора. В этой схеме датчик C_1 включен через согласующий трансформатор *Тр* и коаксиальный кабель *К*, поэтому датчик

вместе с трансформатором может быть отнесен от остальной части схемы на расстояние, составляющее десятки метров, так как изменение длины кабеля незначительно сказывается на точности измерений.

Измерительная схема, в которой используется явление срыва генерации для определения малых изменений емкости, показана на рис. 20. Условием возникновения колебаний генератора в этой схеме является совпадение собственных частот кварца и контура, включающего емкость датчика C_1, переменную емкость C_2 и индуктивность L. Емкость C_3 выбирается значительно большей емкости C_1, и на частоту контура она не оказывает заметного влияния. При изменении емкости C_1 указанное условие нарушается и генерация срывается. Для ее восстановления необходимо, чтобы емкость C_2 увеличилась или уменьшилась настолько, насколько уменьшилась или увеличилась емкость датчика. Поэтому каждому значению емкости C_1 соответствует вполне определенное значение емкости C_2, т. е. вполне определенное положение ротора переменного конденсатора.

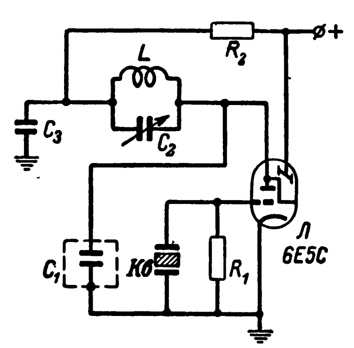


Рис. 20. Измерительная схема, основанная на явлении срыва генерации.

Момент возникновения генерации можно легко установить, используя, например, электронный индикатор $Л$, как это показано на схеме. При возникновении генерации анодный ток лампы падает, что вызывает уменьшение падения напряжения на сопротивлении R_2, в результате чего теневой сектор индикатора резко сужается.

Рассмотренная схема отличается весьма высокой чувствительностью.

СХЕМЫ С ИЗМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

В последнее время в радиоэлектронных приборах для измерения неэлектрических величин большое распространение получили измерительные схемы, использующие зависимость частоты колебаний генератора от электрических

параметров датчика. Эти схемы обычно несколько сложнее, чем измерительные схемы, приведенные выше, но они дают возможность достигнуть более высоких чувствительности и точности измерений..

В измерительных схемах с изменением частоты колебаний измерительного генератора используются различные способы выявления девиации частоты. В зависимости от принятого способа определения девиации частоты измерительного генератора схемы приборов могут быть большей или меньшей сложности. Обычно более простым схемам

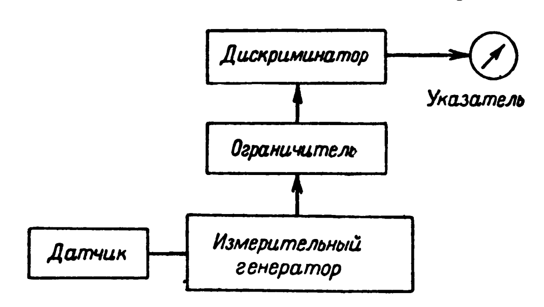


Рис. 21. Блок-схема прибора с измерительной схемой, включающей дискриминатор.

соответствуют в общем случае и меньшие чувствительность и точность измерений.

На рис. 21 приведена блок-схема устройства, в которой выявление девиации частоты осуществляется за счет подачи через ограничитель выходного напряжения измерительного генератора на дискриминатор, преобразующий изменение частоты в изменение напряжения. Дискриминатор обычно настраивается так, чтобы его выходное напряжение было равно нулю при некоторой заданной частоте измерительного генератора. При изменении этой частоты за счет изменения электрических параметров датчиков на выходе дискриминатора появляется сигнал, пропорциональный изменению контролируемой величины. Этот сигнал отмечается указателем. Наличие в схеме ограничителя обеспечивает независимость результатов измерений от колебаний амплитуды выходного напряжения измерительного генератора.

На рис. 22 дана принципиальная схема радиоэлектронного прибора с емкостным датчиком, построенная в соответствии с рассмотренной выше блок-схемой.

Измерительный генератор в этой схеме собран на триоде $Л_1$. Датчик C_1 включен в контур генератора через трансформатор $Тр_1$. Лампа $Л_2$ обеспечивает за счет отсечки сигнала в сеточной цепи ограничение подаваемого напряжения, а также усиление ограниченного сигнала. Нагрузкой усилителя является трансформатор фазового дискриминатора $Тр_2$. Выходное напряжение дискриминатора, снимаемое с катодов двойного диода $Л_3$, подается на указатель $У$.

В приведенной схеме резко снижена чувствительность ее к изменениям емкости и индуктивности проводов, соеди-

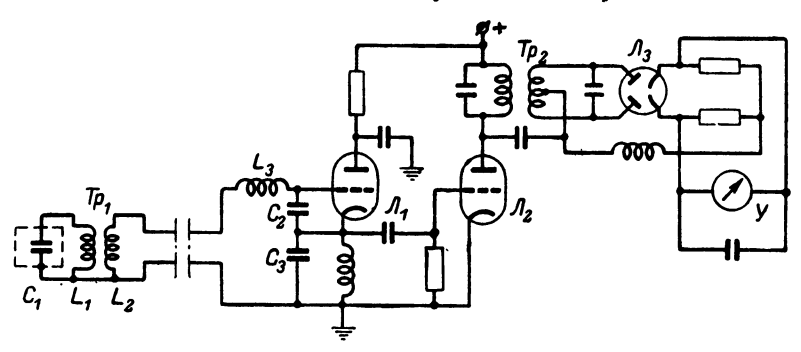


Рис. 22. Принципиальная схема прибора с измерительной схемой, включающей дискриминатор.

няющих вторичную обмотку трансформатора $Тр_1$ с генератором. При этом чувствительность схемы к изменениям емкости датчика остается достаточно высокой.

Возможность уменьшения влияния изменений электрических параметров соединительных проводов при сохранении высокой чувствительности схемы к изменению емкости датчика связана с тем, что его емкость входит в колебательный контур L_1C_1, а емкость кабеля — в колебательный контур, включающий индуктивности кабеля, а также L_2, L_3 и емкости C_2 и C_3. При большой связи между указанными контурами удается возбудить колебания генератора на такой частоте, для которой изменение емкости во втором контуре сказывается на частоте генератора в 20—30 раз меньше, чем изменение на такую же величину емкости в первом контуре. В соответствии с этим изменение емкости кабеля влияет на точность измерений весьма мало, если емкости кабеля и датчика соизмеримы.

Разумеется, что сказанное выше в полной мере относится и к высокочастотным индуктивным датчикам.

На рис. 23 изображена блок-схема устройства, в котором для определения девиации частоты измерительного генератора используется метод биений.

Сущность этого метода применительно к рассматриваемому случаю заключается в том, что девиация частоты измерительного генератора определяется по изменению разности частоты последнего и частоты опорного стабильного генератора.

Для определения изменения указанной разностной частоты напряжения опорного и измерительного генераторов

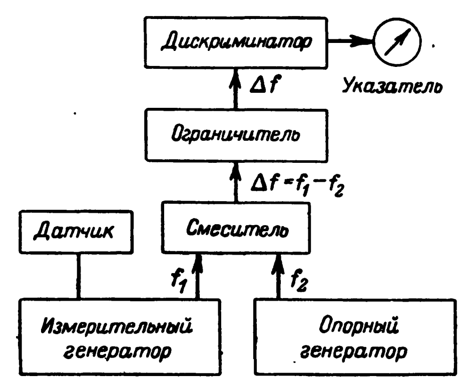


Рис. 23. Блок-схема прибора, построенного по методу биений.

подаются на смеситель. На выходе смесителя появляется напряжение, имеющее частоту, равную разности частот указанных генераторов. Это напряжение поступает сперва на ограничитель, а с его выхода — на дискриминатор. Включенный на выходе дискриминатора указатель дает отклонение, пропорциональное изменению этой разностной частоты.

В рассматриваемой схеме дискриминатор выделяет девиацию разностной частоты, поэтому он настраивается на значительно более низкую частоту по сравнению с частотой измерительного генератора. В связи с этим нестабильность дискриминатора в приведенной схеме сказывается значительно меньше, чем в рассмотренной ранее схеме. В схемах с применением опорных генераторов большие погрешности могут быть вызваны изменением их частоты.

Поэтому опорные генераторы должны быть по частоте весьма стабильными.

Возможность использования в рассматриваемой схеме дискриминатора, имеющего значительно более низкую частоту по сравнению с измерительным генератором, дает возможность существенно увеличить чувствительность схемы, так как весь диапазон изменений частоты, а следовательно, и выходного напряжения дискриминатора в этом случае соответствует малому относительному изменению частоты измерительного генератора.

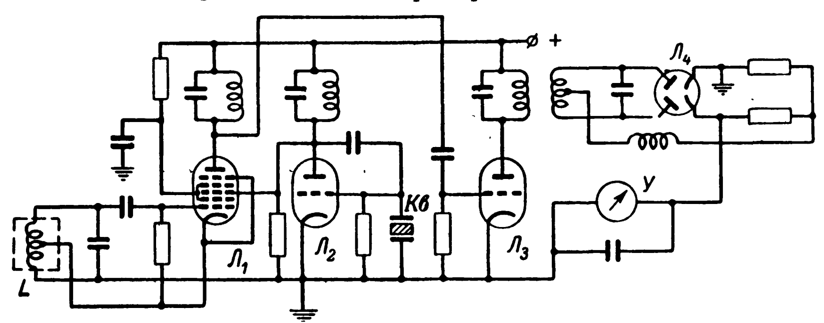


Рис. 24. Принципиальная схема прибора, построенного по методу биений.

Упрощенная принципиальная схема прибора с высокочастотным датчиком, построенная по рассмотренной блок-схеме, приведена на рис. 24.

Как видно из этой схемы, измерительный генератор и смеситель собраны на одной многосеточной лампе $Л_1$. Датчик L включен в контур измерительного генератора. Опорный генератор, собранный на триоде $Л_2$, стабилизирован кварцем *Кв*. Выходное напряжение этого генератора подается на третью сетку лампы $Л_1$. С нагрузки этой лампы напряжение разностной частоты подается на сетку триода $Л_3$. В сеточной цепи триода сигнал ограничивается. Снимаемое с анода лампы $Л_3$ усиленное напряжение поступает на фазовый дискриминатор. Указатель *У* фиксирует выходное напряжение дискриминатора, которое при нормальной настройке пропорционально девиации частоты, вызываемой весьма незначительными изменениями электрических параметров датчика.

Разумеется, что многообразие схем с использованием изменения частоты колебаний измерительного генератора не исчерпывается приведенными выше принципиальными

схемами. Находят применение схемы, в которых ограничение амплитуды измерительного генератора достигается за счет выбора режима его работы; используются также схемы с двумя измерительными генераторами, схемы с измерительными генераторами *RC* и ряд других схем. В последнее время в связи с использованием устройств с емкостными датчиками, в которых изменение частоты измерительного генератора отсчитывается с точностью до 0,001 %, все чаще находят также применение специальные измерительные схемы, которые включают эталонные генераторы высокой стабильности и сложные пересчетные схемы.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

НЕКОТОРЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ С ВЫСОКОЧАСТОТНЫМИ ДАТЧИКАМИ

ЕМКОСТНЫЙ СИГНАЛИЗАТОР УРОВНЯ

Для контроля заданного уровня многих жидких и сыпучих сред может быть использован простой сигнализатор с емкостным датчиком. Емкостный сигнализатор может быть использован, например, для определения в резервуарах уровня воды, кислотных и щелочных растворов, нефтепродуктов, масел и других жидких сред, для контроля степени заполнения бункеров мукой, зерном, мелом, солью и другими сыпучими материалами. При заметной разнице диэлектрической проницаемости двух сред рассматриваемый сигнализатор может быть применен для контроля уровня границы раздела этих сред.

Схема сигнализатора приведена на рис. 25. Основной частью схемы является высокочастотный генератор, собранный на двойном триоде $Л_1$. Анодный контур генератора состоит из индуктивности L_1 и емкости датчика C_1, а сеточный—из индуктивности L_2 и емкости C_2. Сеточный контур настраивается на частоту, близкую к частоте генератора, которая лежит в пределах 1—2 *Мгц*.

Емкостный датчик чаще всего представляет собой круглый электрод, который погружается в контролируемую среду. Для токопроводящих и агрессивных сред электрод датчика покрывается электроизоляционным и антикоррозийным лаком или пластиком.

Генератор настраивается так, чтобы генерация срывалась при изменении уровня среды на величину, большую

допустимой. Такая настройка достигается относительно просто, так как емкость датчика при незначительном изменении уровня среды обычно возрастает или уменьшается весьма заметно по сравнению с первоначальной его емкостью. Срыв генерации приводит к увеличению анодного тока лампы $Л_1$, в результате чего срабатывает реле *Р*, включенное в анодную цепь этой лампы. Контакты реле замыкают цепь лампы $Л_2$, сигнализирующей об отклонении

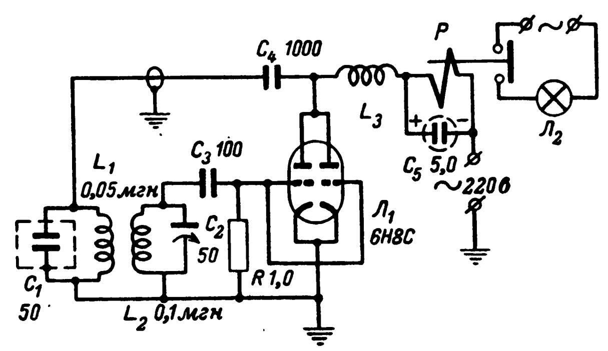


Рис. 25. Схема емкостного сигнализатора уровня.

контролируемого уровня от заданного значения. Очевидно, что при необходимости контакты реле *Р* могут включить устройства, обеспечивающие восстановление нормального уровня среды. Датчик соединяется со схемой коаксиальным кабелем.

В схеме рассмотренного сигнализатора срыв генерации наступает при изменении емкости датчика на 4—5 *пф*, что обычно соответствует изменению уровня в несколько миллиметров.

ЭЛЕКТРОННОЕ РЕЛЕ

В некоторых случаях желательно осуществить автоматическое включение какого-либо исполнительного устройства при отклонении стрелки чувствительного указывающего прибора до заданного показания. Для этой цели может быть использовано электронное реле с индуктивным датчиком.

Схема этого реле приведена на рис. 26. Сущность его работы заключается в следующем.

На стрелке указывающего прибора укрепляется флажок из алюминиевой фольги. Две миниатюрные спираль-

ные обмотки, составляющие датчик L_1, устанавливаются так, что при отклонении стрелки прибора до заданного показания флажок входит в зазор между обмотками датчика. Так как датчик включен в контур высокочастотного генератора, то в связи с присутствием металлического флажка в зазоре датчика настройка контура нарушается и амплитуда колебаний в контуре резко падает, что приводит к соответствующему увеличению анодного тока генераторной лампы *Л*. В результате этого срабатывает реле *Р* и включает необходимое исполнительное устройство.

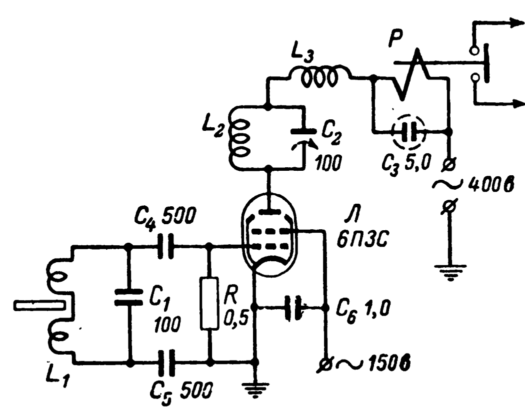


Рис. 26. Схема электронного реле.

Схема генератора реле построена с использованием связи через междуэлектродную емкость лампы *Л* анодного контура L_2C_2 с сеточным контуром L_1C_1. Настройка схемы производится конденсатором C_2.

Обмотка датчика выполняется в виде плоских двуслойных спиральных катушек диаметром 8—9 *мм*, намотанных проводом ПЭЛ 0,6—0,7. Обмотки располагаются на расстоянии 1,5—2 *мм* одна от другой.

В случае необходимости фиксировать отклонение стрелки в обе стороны от заданного значения контролируемой величины используются два электронных реле. Размеры флажка могут быть взяты такими, чтобы при указанных значениях этой величины срабатывали оба реле.

Схема реле может быть настроена с помощью конденсатора C_2 и таким образом, чтобы при входе флажка в зазор между обмотками датчика амплитуда колебаний в контуре возрастала, а следовательно, анодный ток генераторной лампы падал.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ДЕФЕКТОСКОП

Для определения качества металлических деталей широкое применение нашли высокочастотные дефектоскопы. Они могут обнаружить весьма ничтожные по размерам трещины, находящиеся как на поверхности, так и на некоторой глубине в теле контролируемой детали. В этих дефектоскопах используются высокочастотные индуктивные датчики, перемещаемые по поверхности испытываемой детали.

Интенсивность вихревых токов, возникающих на участке под обмоткой датчика, зависит от электрической прово-

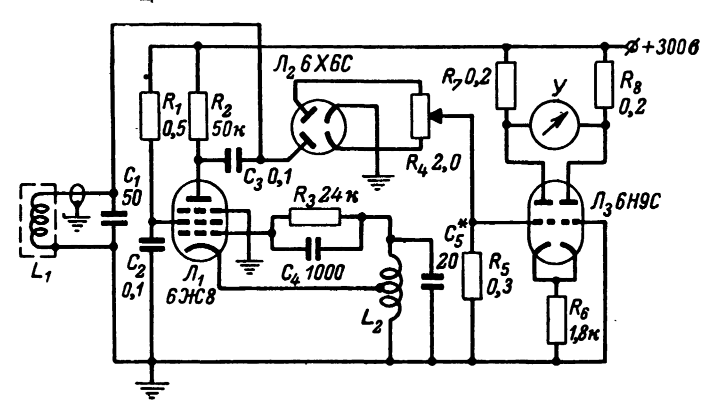


Рис. 27. Схема высокочастотного дефектоскопа.
Данные обмоток: L_1 — 500 витков ПЭЛ 0,1, диаметр каркаса 8 *мм*; L_2 — 260 + 460 витков ПЭШО 0,25, диаметр каркаса 20 *мм*.

димости этого участка. Так как эквивалентная проводимость участка при наличии трещины меньше, чем проводимость других участков, то при нахождении датчика над трещиной увеличиваются добротность и индуктивность его обмотки. Фиксируя момент возрастания добротности или индуктивности обмотки датчика, можно установить местонахождение трещины.

На рис. 27 приведена схема одного из типов высокочастотных дефектоскопов. В схему входят высокочастотный индуктивный датчик L_1, генератор и усилитель, собранные на лампе $Л_1$, детектор на лампе $Л_2$, мостовая схема на лампе $Л_3$ и указатель *У*.

Генератор собран по трехточечной автотрансформаторной схеме на генераторном триоде, анодом которого яв-

ляется экранирующая сетка лампы $Л_1$. Защитная сетка этой лампы является управляющим электродом усилителя, в анодную цепь которого включена нагрузка, представляющая собой параллельное соединение по высокой частоте (400 *кгц*) сопротивления R_2 и контура L_1C_1. С этой нагрузки усиленное напряжение подается на анод левого (по схеме) диода лампы $Л_2$. Выпрямленное этим диодом напряжение подается на делитель, состоящий из части сопротивления R_4 и сопротивления R_5. С сопротивления R_5 напряжение снимается на сетку левого триода мостовой схемы.

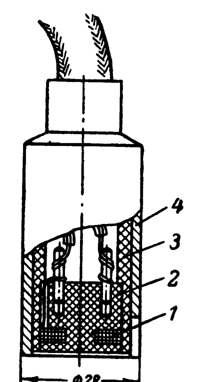


Рис. 28. Конструкция датчика высокочастотного дефектоскопа.

Для увеличения чувствительности прибора необходимо скомпенсировать напряжение на сопротивлении R_5, которое подается при установке датчика на участке поверхности детали без трещин. Компенсацию указанного напряжения можно осуществить за счет напряжения, создаваемого током эмиссии правого (по схеме) диода лампы $Л_2$. Перемещая движок потенциометра R_4, легко подобрать такое его положение, при котором напряжение на сопротивлении R_5 полностью компенсируется и мостовая схема уравновешивается. Таким образом, при нахождении датчика на участках поверхности детали без дефектов стрелка указателя *У* находится на нулевой отметке шкалы.

При нахождении датчика на участке детали с трещиной изменяется подстройка контура L_1C_1, что влечет за собой изменение напряжения, снимаемого с нагрузки усилителя, а следовательно, напряжения на сетке левого (по схеме) триода лампы $Л_3$. Это приводит к разбалансировке мостовой схемы и отклонению стрелки указателя, тем большему, чем значительнее нарушена на контролируемом участке целостность материала детали.

Конструкция датчика дефектоскопа показана на рис. 28. Обмотка датчика *1* наматывается на каркас из органического стекла *2*, укрепленный в эбонитовой оправке *3*. Последняя устанавливается в металлический кожух *4* , имеющий в нижней части разрез для уменьшения потерь в нем. Выводы обмотки припаиваются к штырькам, укрепленным в каркасе *2*. Датчик соединяется со схемой коаксиальным кабелем.

Описанным выше дефектоскопом удается обнаружить трещины размером до долей миллиметра не только на поверхности детали, но и под поверхностью на 0,2—0,3 *мм*, а также под слоем гальванических и других покрытий.

ИНДУКТИВНЫЙ ОБНАРУЖИТЕЛЬ МЕТАЛЛОВ

Для обнаружения металлических тел, находящихся в транспортируемом конвейером материале, может быть использовано устройство, схема которого дана на рис. 29. В эту схему входят индуктивный мост, включающий два датчика: L_1 и L_2, усилитель на лампах $Л_1$ и $Л_2$, исполнительное реле *Р* и генератор, собранный на лампе $Л_3$.

При попадании металлического тела в один из датчиков изменяется индуктивность его обмотки. В результате

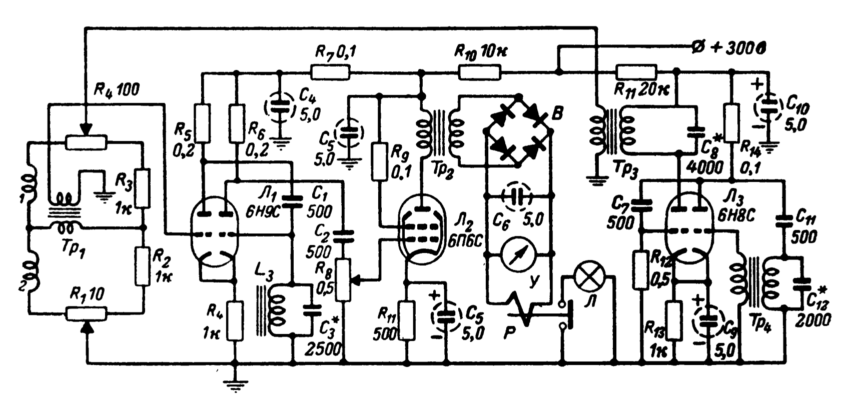


Рис. 29. Схема индуктивного обнаружителя металлов.

этого на выходе мостовой схемы, а следовательно, на вторичной обмотке трансформатора $Тр_1$ появляется напряжение. Это напряжение усиливается и со вторичной обмотки трансформатора $Тр_2$ поступает на выпрямитель *В*. С выхода выпрямителя постоянное напряжение подается к исполнительному реле *Р*, которое замыкает цепь сигнальной лампы *Л*, а также устройства, обеспечивающие выключение двигателя конвейера.

Для питания мостовой схемы используется генератор, частота которого выбирается обычно в пределах нескольких килогерц. Такая частота обеспечивает достаточную чувствительность к металлическим телам и дает возмож-

ность использовать обмотки датчиков большого размера, охватывающих конвейерную ленту.

Генератор собран на двойном триоде $Л_3$. Правый (по схеме) триод используется в схеме задающего генератора, а левый — усилителя мощности. Частота задающего генератора определяется контуром, включающим индуктивность первичной обмотки трансформатора $Тр_4$ и емкость конденсатора C_{12}.

Напряжение питания мостовой схемы снимается со вторичной обмотки трансформатора $Тр_3$, первичная обмотка которого включена в анодную цепь лампы усилителя мощности.

В мостовую схему, кроме датчиков, входят постоянные сопротивления R_2, R_3 и переменные сопротивления R_1, R_4, используемые для уравновешивания мостовой схемы при настройке.

Для подавления наводок, отличающихся по частоте от полезного сигнала, в сеточную цепь лампы второго каскада усилителя включен фильтрующий контур L_3C_3, настроенный на частоту генератора.

В связи с возможностью самопроизвольного нарушения равновесия мостовой схемы из-за изменения параметров ее элементов при изменении температуры внешней среды и других причин параллельно реле подключен указатель (вольтметр) *У*, по отклонению стрелки которого судят о балансе моста. При отсутствии металла на конвейер вблизи датчиков стрелка указателя не должна отклоняться больше чем на 0,2—0,3 напряжения срабатывания реле.

Для конвейера с шириной ленты 1 000 *мм* рекомендуются датчики с обмотками, имеющими ширину 1 200 и высоту 500 *мм*. Число витков обмотки каждого датчика 230, провод обмоток ПБД 1,5. Провода, соединяющие обмотки датчика со схемой, желательно делать по возможности короче (не длиннее 20—30 *м*).

Обнаружитель металлов, построенный по приведенной схеме, надежно сигнализирует прохождение через датчики стальной детали весом около 1 *кг*.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ МЕТАЛЛОИСКАТЕЛЬ

Длинные стальные детали, находящиеся под слоем земли или другой малопроводящей среды, могут быть обнаружены относительно простым электронным прибором, схема которого приведена на рис. 30.

Эта схема построена по принципу сравнения частот

двух генераторов, изложенному в предыдущей главе. Схема включает два генератора (измерительный и опорный), смеситель и усилитель, работающий на динамический громкоговоритель.

Опорный генератор собран по трехточечной схеме на лампе $Л_2$. Колебательный контур генератора составляют индуктивность L_3 и емкость C_6. По аналогичной трехточечной схеме на лампе $Л_1$ собран и измерительный генератор. Его колебательный контур составляют индуктивность датчика L_1 и емкость конденсатора C_1. Лампа $Л_1$ одновременно используется в качестве смесителя; в связи с этим на ее

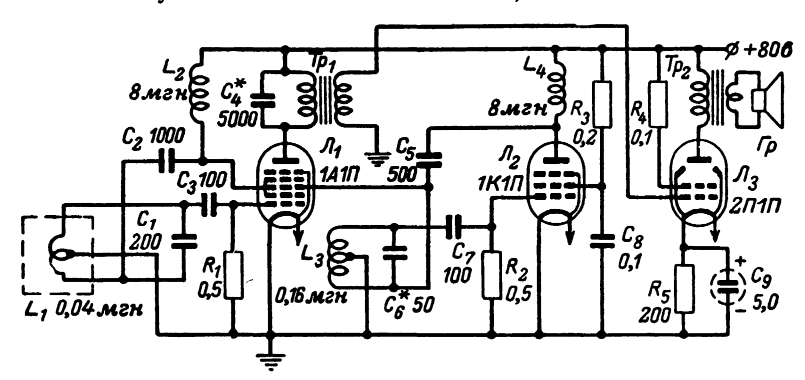


Рис. 30. Схема высокочастотного металлоискателя.

третью сетку подается напряжение с анода лампы $Л_2$. Первичная обмотка трансформатора $Тр_1$, включенная в анодную цепь лампы $Л_1$, настраивается конденсатором C_4 на частоту 2 000—3 000 *гц*. Опорный генератор имеет частоту (1—2 *Мгц*), близкую к частоте измерительного генератора при отсутствии вблизи датчика металлических масс.

При необходимости обнаружить скрытую в земле стальную деталь датчик перемещается вблизи ее поверхности. Приближение датчика к стальной детали сопровождается увеличением индуктивности обмотки датчика, а следовательно, уменьшением частоты измерительного генератора. Если разность между частотами опорного и измерительного генераторов достигнет 2 000—3 000 *гц*, на управляющую сетку усилительной лампы $Л_3$ будет подано значительное напряжение и во вторичной обмотке выходного трансформатора $Тр_2$ будет выделена необходимая мощность, обусловливающая возникновение ясно слышимого звукового сигнала.

Датчик рассматриваемого прибора представляет собой обмотку из 15 витков провода диаметром 2—2,5 *мм*. Диаметр обмотки 100 *мм*, шаг 3 *мм*.

Рассмотренная схема дает возможность обнаружить, в частности, стальные полосы шириной 40—50 *мм*, зарытые в землю на глубину 30—40 *см*.

ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОМЕТР

На рис. 31 приведена схема электронного микрометра с высокочастотным индуктивным датчиком для контроля диаметра проводов. Схема включает в себя генератор, собранный на левом (по схеме) триоде лампы, а также ламповый мост, в который, кроме указанного триода, входят правый триод лампы *Л* и сопротивления R_1 и R_2.

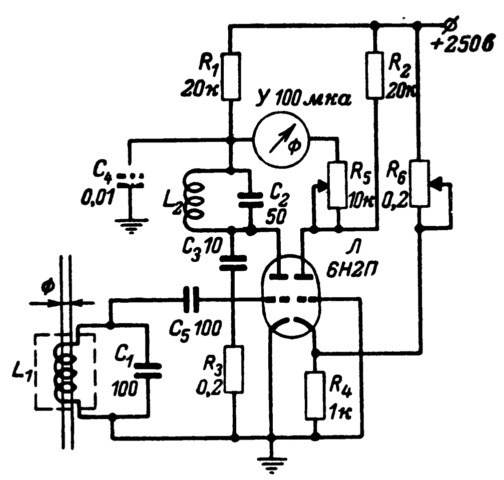


Рис. 31. Схема электронного микрометра. Данные обмоток: L_1 — 20 витков ПЭЛ 0,1 (диаметр каркаса 12 *мм*); L_2 — 20 витков ПЭЛ 1,0 (диаметр каркаса 20 *мм*).

Индуктивность датчика L_1 и емкость C_1 составляют сеточный контур генератора, а индуктивность L_2 и емкость C_2—его анодный контур. Связь контуров осуществляется через междуэлектродную емкость триода и конденсатор C_3.

При номинальном диаметре контролируемого провода переменным сопротивлением R_6 на сетке правого (по схеме) триода за счет падения напряжения на сопротивлении R_4 устанавливается такое отрицательное смещение, при

котором ламповый мост уравновешивается и ток в указателе $У$ уменьшается до нуля.

При увеличении диаметра контролируемого провода уменьшаются, как уже упоминалось, добротность и индуктивность обмотки датчика. Это приводит к уменьшению амплитуды колебаний генератора за счет расстройки его сеточного контура. Следствием уменьшения амплитуд колебаний является снижение отрицательного смещения на сетке левого (по схеме) триода лампы, а следовательно, возрастание его анодного тока. В результате этого мост разбалансируется и в указателе возникает ток, обусловливающий отклонение стрелки указателя вправо пропорционально увеличению контролируемого диаметра. При уменьшении диаметра указанного провода увеличиваются добротность и индуктивность обмотки датчика. Это приводит в конечном итоге к возникновению соответствующего тока в указателе и отклонению его стрелки влево пропорционально уменьшению измеряемого диаметра.

Изменением сопротивления R_5 можно регулировать чувствительность схемы к отклонению диаметра провода от номинала. Частота генератора, используемого в рассматриваемой схеме, выбирается в пределах 10—15 *Мгц*.

Характеристика датчика рассматриваемого микрометра, а также размеры датчика и его обмоточные данные приведены на рис. 11. Эти характеристики относятся к медным и алюминиевым проводам. Без большой погрешности, как уже упоминалось, они могут быть использованы и для латунной проволоки, а также для проволок из сплавов других цветных металлов.

Точность измерений описанным микрометром составляет 2—3% измеряемого диаметра.

РЕЗОНАНСНЫЙ ВЛАГОМЕР

Для измерения влажности сыпучих материалов часто используются влагомеры с емкостными датчиками, включенными в измерительные схемы, которые построены на принципе срыва генерации при нарушении резонансной настройки контура с датчиком.

Схема одного из таких резонансных влагомеров приведена на рис. 32. Прибор включает в себя генератор на лампе $Л_1$ и усилитель с электронным индикатором на лампе $Л_2$.

При заполнении сухим контролируемым веществом про-

странства между электродами датчика C_1 генерация возникнет в случае, если при полностью введенной емкости C_2 подобрать такую емкость C_4, чтобы резонансный контур, включающий указанные емкости, а также емкости C_3, C_4 и индуктивность L, был настроен на частоту кварца *Кв*. Возникновение генерации приводит к резкому уменьшению анодного тока ламп $Л_1$ и $Л_2$. В связи с этим скачком уменьшается падение напряжения на сопротивлении R_4 и затемненный сектор индикатора лампы $Л_2$ почти полностью исчезает.

При заполнении после этого датчика влажным контролируемым материалом анодный контур генератора за счет

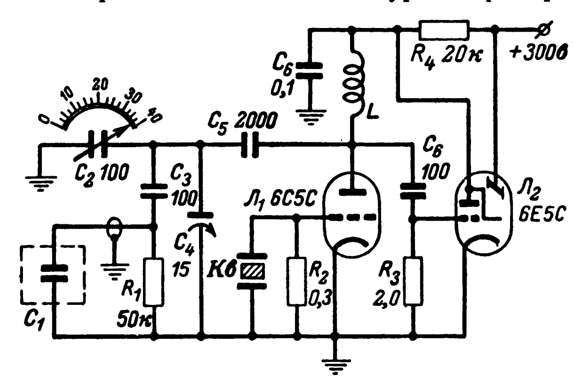


Рис. 32. Схема резонансного влагомера. Данные обмотки: $L = 30$ витков ПЭЛ 1,0, диаметр каркаса 20 *мм*.

увеличения емкости C_1 расстраивается и генерация срывается. Для восстановления генерации емкость C_2 уменьшается настолько, насколько увеличилась емкость C_1. Очевидно, что при различной влажности контролируемого материала восстановление генерации будет происходить при различном изменении емкости C_2. Поэтому и поворот оси ротора конденсатора C_2 в зависимости от влажности материала будет разным. Это дает возможность, связав стрелку указателя с ротором конденсатора C_2, определять после предварительной тарировки влажность контролируемого материала по положению стрелки указателя.

Для уменьшения влияния изменения электропроводности контролируемого материала на точность измерений датчик C_1 шунтирован сопротивлением R_1. Изолировать электроды датчика от контролируемого материала нецеле-

сообразно, так как это существенно понижает чувствительность схемы из-за появления малой емкости, обусловливаемой изоляционным покрытием, последовательно включенной с емкостью C_1. Частота колебаний используемого в схеме генератора обычно 3—4 *Мгц*.

Конструкция одного из датчиков электронного влагомера показана на рис. 33. Датчик собирается из двух изолированных друг от друга электродов: внутреннего, имеющего ножевую форму, и внешнего, охватывающего внутренний электрод с двух сторон. Датчик снабжается ручкой, с помощью которой электроды вводятся в контролируемую массу.

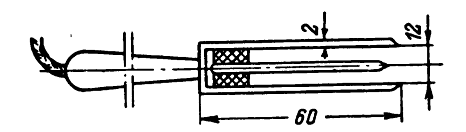


Рис. 33. Конструкция датчика резонансного влагомера.

Размеры электродов датчика показаны на рис. 33 (их ширина 20 *мм*). Датчик соединен с измерительной схемой коаксиальным кабелем, например типа РК-3, длиной 0,75—1 *м*. Экранирующая оплетка кабеля припаивается к внешнему электроду датчика.

Рассмотренный резонансный влагомер дает возможность определить наличие 0,1 *г* воды в 10 *г* контролируемой массы.

ЭКРАННЫЙ ТОЛЩИНОМЕР

В гл. 2 рассмотрена сущность работы датчика для измерения толщины фольги цветных металлов, основанного на экранирующем действии вихревых токов. На рис. 34 приведена схема прибора, в котором используется этот датчик. Эта схема включает в себя измерительную часть, собранную на лампе $Л_1$, и генератор на лампе $Л_2$.

Между двумя обмотками датчика L_1 и L_2 непрерывно движется контролируемая лента. Электродвижущая сила, наводимая в воспринимающей обмотке датчика L_2, при прочих неизменных условиях зависит от толщины фольги и тока задающей обмотки L_1. Для данной толщины фольги ток этой обмотки при помощи переменного сопротивления R_6 устанавливается таким, чтобы напряжение на

сетке левого (по схеме) триода лампы $Л_1$ было равно напряжению на сетке ее правого триода. В этом случае при симметрии лампового моста ток в указателе $У$ отсутствует. При отклонении толщины фольги от заданного номинала напряжение на сетке левого триода изменится, равновесие моста нарушится и стрелка указателя отклонится на угол, пропорциональный изменению толщины контролируемой фольги. В связи с тем, что напряжение на сетке правого триода остается неизменным, каждой толщине фольги со-

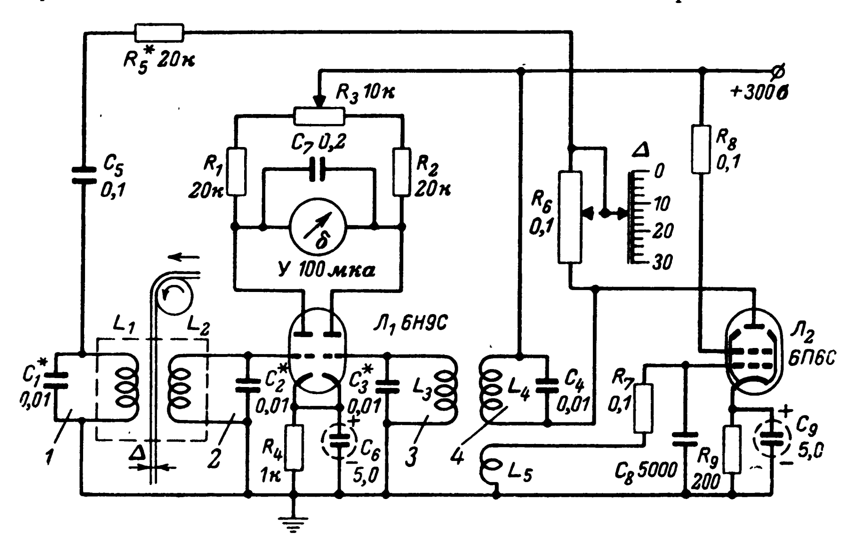


Рис. 34. Схема экранного толщиномера.
Данные обмоток: L_1, L_2, L_3, L_4 — 600 витков ПЭЛ 0,3, диаметр каркаса 25 *мм*, высота каркаса 10 *мм*; L_5 — 200 витков ПЭЛ 0,2, наматывается на каркасе L_4.

ответствует вполне определенное значение сопротивления R_6, при котором наступает равновесие моста. Поэтому толщина фольги может быть определена после соответствующей тарировки по положению движка переменного сопротивления R_6.

Для увеличения чувствительности схемы контуры *2* и *3* настраиваются в резонанс с частотой генератора, которая обусловливается контурами *1* и *4*. Эта частота в зависимости от толщины фольги и удельного сопротивления выбирается в соответствии с формулой (15). Например, для измерения толщины алюминиевой фольги в диапазоне 10—60 *мк* используется частота около 20 *кгц*.

Конструкция датчика показана на рис. 35. Задающая *1* и воспринимающая *2* обмотки датчика крепятся к гетинаксовым крышкам *3*, которые в свою очередь укрепляются в латунных экранах *4* и *5*. Последние скреплены жестким держателем *6*, обеспечивающим постоянство зазора между обмотками.

Практически достижимая чувствительность экранного толщиномера составляет десятые доли микрона, а точность для указанного выше диапазона толщин алюминиевой фольги примерно равна 1—2 *мк*.

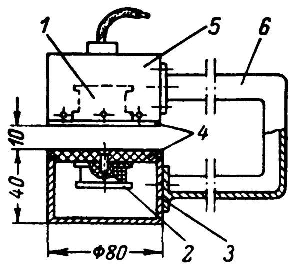


Рис. 35. Конструкция датчика экранного толщиномера.

При перемещении фольги в зазоре датчика возникают заметные погрешности измерений. Они могут быть существенно изменены, если настроить контур *1* так, чтобы приближение фольги к обмотке L_1 вызывало уменьшение ее тока, а следовательно, компенсировалось увеличение при этом перемещении э. д. с. обмотки L_2.

Прибор может быть использован также для измерения толщины лент из меди, свинца, латуни и других немагнитных металлов и сплавов. Для материалов с различной проводимостью необходимо производить соответствующую градуировку шкалы.

ЕМКОСТНЫЙ МИНИМЕТР

На рис. 36 приведена схема емкостного миниметра, предназначенного для измерения отклонения размеров плоских деталей от заданного номинального значения. Схема содержит следующие узлы: измерительный мост с дифференцальным емкостным датчиком C_1, усилитель, собранный на пентоде $Л_1$, фазочувствительный ламповый мост на двойном триоде $Л_2$, указатель $У$, а также генератор, работающий на лампе $Л_3$.

При номинальном значении размера детали (обычно при этом подвижный электрод датчика смещен относительно своего среднего положения) движок переменного сопротивления R_3 устанавливается так, чтобы измерительный мост был уравновешен, что определяется по отсутствию отклонения стрелки указателя.

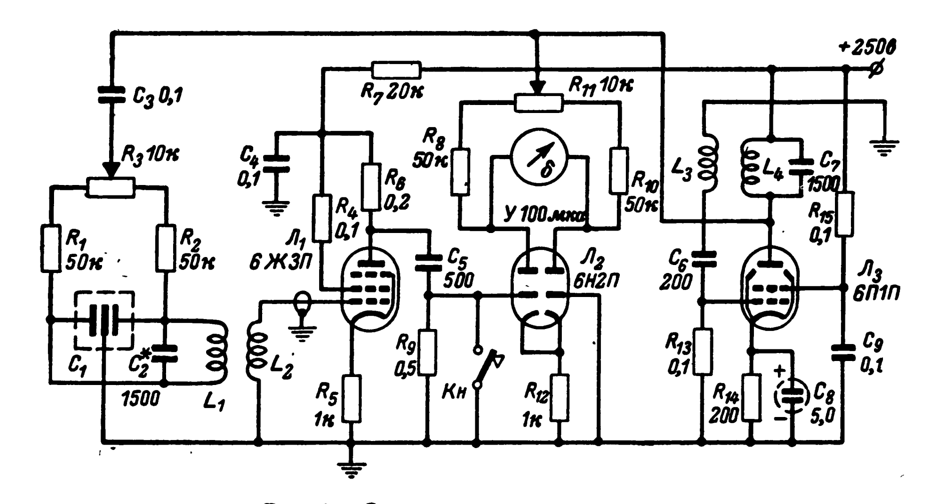


Рис. 36. Схема емкостного миниметра.
Данные обмоток: L_1, L_3 — 60 витков ПЭЛ 0,7, диаметр каркаса 25 *мм*; L_2 — 180 витков ПЭЛ 0,2, наматывается на каркасе L_1; L_4 — 20 витков ПЭЛ 0,7, наматывается на каркасе L_3.

При увеличении или уменьшении номинального размера детали за счет изменения отношения емкостей дифференциального датчика на выходе измерительного моста появляется сигнал, который посредством настроенного трансформатора L_1L_2 подается на вход усилителя. С нагрузки усилительной лампы $Л_1$ сигнал поступает на сетку левого (по схеме) триода лампы $Л_2$, в результате чего в указателе *У* возникает ток, величина которого зависит от значения измеряемого отклонения, а полярность от знака его. Фаза сигнала, снимаемого с нагрузки лампы $Л_1$, определяет полярность тока указателя, так как ламповый мост питается от того же генератора, что и измерительный мост. Частота используемого в схеме генератора 400—500 *кгц*. Для обеспечения первоначального уравновешивания лампового моста в схеме предусмотрена кнопка *Кн*. Замкнув этой кнопкой сетку левого триода лампы $Л_2$ на корпус,

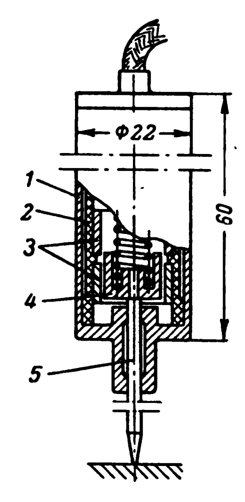


Рис. 37. Конструкция датчика емкостного миниметра.

можно сопротивлением R_{11} установить стрелку указателя на нуль.

Конструкция датчика миниметра показана на рис. 37. В латунном корпусе *1* укреплен цилиндр *2* из высококачественного текстолита. В этом цилиндре коаксиально с ним закреплены два одинаковых латунных кольца *3*, являющихся внешними электродами датчика. Внутренний электрод датчика *4* представляет собой металлическую чашу, насаженную на стальной шток *5*. Последний, свободно перемещаясь в корпусе, передвигает чашу относительно колец *3*. Для отжатия штока к поверхности контролируемой детали используется пружина, упирающаяся в дно чаши. Зазор между кольцами и чашей не превышает 0,15 *мм*. Корпус датчика при измерениях закрепляется неподвижно относительно плоскости, на которую помещается проверяемое изделие.

Чувствительность рассмотренного емкостного миниметра достигает десятых долей микрона. Точность его—около 0,5 *мк*. Диапазон измерений (отклонений размеров) по шкале указателя 25 *мк*. Диапазон перемещений штока ±5 *мм*.

ИНДУКТИВНЫЙ ТОЛЩИНОМЕР

Упоминавшийся в гл. 2 метод измерения смещений относительно проводящей поверхности нашел применение, в частности, для создания приборов, определяющих толщину лент изоляционных материалов.

На рис. 38 дана схема одного из таких толщиномеров. Датчик толщиномера состоит из двух скрепленных обмоток: возбуждающей L_1 и воспринимающей L_2. Обмотка L_1 питается током высокой частоты.

При установке датчика на поверхности контролируемой ленты, лежащей на металлической пластинке, за счет вихревых токов в пластинке ослабляется магнитный поток, охватывающий воспринимающую обмотку. Вследствие этого индуктируемая в обмотке э. д. с. уменьшается. Степень ее уменьшения зависит от толщины ленты. Измеряя напряжение на выходе воспринимающей обмотки, можно определить толщину проверяемой ленты.

В схему рассматриваемого толщиномера, кроме датчика, входят выпрямитель на диоде $Л_1$, источник стабилизированного напряжения на стабилитроне $Л_2$, указатель *У*, генератор на пентоде $Л_3$, а также электронный регулятор,

стабилизирующий ток обмотки L_1, собранный на лампах $Л_4$, $Л_5$ и $Л_6$.

Перед измерением датчик толщиномера устанавливают на поверхности металлической пластинки и, перемещая движок переменного сопротивления R_3, компенсируют выпрямленное диодом $Л_1$ напряжение.

При измерениях датчик устанавливается на поверхность ленты, лежащей на указанной пластинке. В связи с перемещением обмоток датчика относительно проводящей

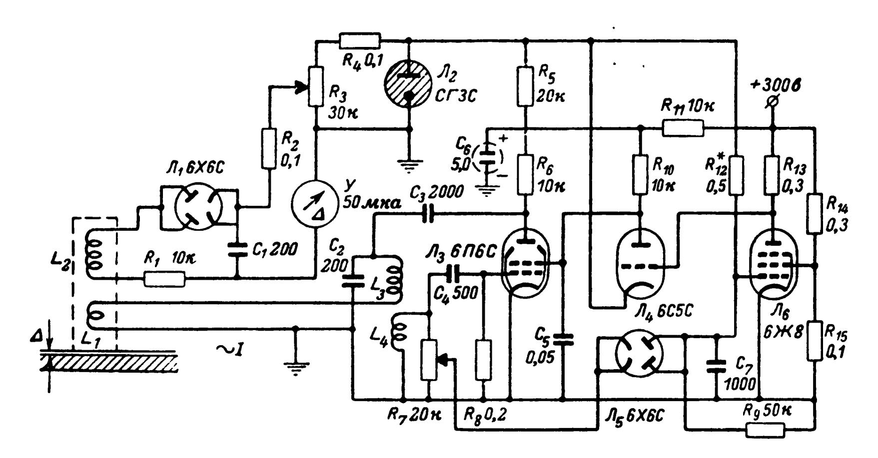


Рис. 38. Схема индуктивного толщиномера.
Данные обмоток: L_1 — 10 витков ПЭЛ 1,0, диаметр каркаса 10 *мм*; L_2—60 витков ПЭЛ 0,3, диаметр каркаса 13 *мм*; L_3 — 40 витков ПЭЛ 1,0, диаметр каркаса 12 *мм*; L_4—10 витков ПЭЛ 0,3, наматывается на каркасе L_3.

поверхности стрелка указателя отклонится на угол, соответствующий толщине ленты.

Амплитуда э. д. с., наводимой в обмотке L_2, зависит не только от толщины контролируемой ленты, но, очевидно, и от тока в обмотке L_1, поэтому для обеспечения высокой точности измерений необходимо поддерживать этот ток неизменным.

Регулировку тока обмотки L_1 или, что то же, тока I в контуре можно осуществить за счет изменения напряжения на экранирующей сетке лампы генератора. Этот способ и принят в приведенной схеме.

При увеличении по какой-либо причине тока I возрастает выходное напряжение обмотки L_4, что влечет за

собой увеличение тока, выпрямленного диодом $Л_5$, а следовательно, отрицательного смещения на первой сетке лампы $Л_6$. В результате этого напряжение на аноде лампы $Л_6$ увеличивается, а на аноде лампы $Л_4$ падает. Это приводит к понижению потенциала третьей сетки лампы генератора, а следовательно, уменьшению тока I практически до его номинального значения. При уменьшении тока I отрицательное смещение на управляющей сетке лампы $Л_4$ уменьшается, что влечет за собой в конечном итоге возрастание потенциала на экранирующей сетке лампы $Л_3$, и ток I должен возрасти до восстановления своего номинального значения с малой ошибкой.

Установка первоначального отрицательного смещения на сетке лампы $Л_6$ производится переменным сопротивлением R_3. Частота генератора, используемого в схеме, — около 2 *Мгц*. Для увеличения чувствительности обмотка L_2 часто настраивается в резонанс на частоту генератора. В связи с большим значением межвитковой емкости этой обмотки частота генератора должна выбираться с учетом ее собственной частоты.

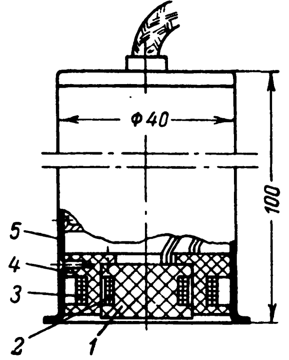


Рис. 39. Конструкция датчика индуктивного толщиномера.

Характеристика датчика, работающего в рассматриваемой измерительной схеме, была приведена ранее на рис. 12. Там же указаны данные обмоток датчика.

Для исключения влияния соединительных проводов на резонансную настройку обмотки L_2, а следовательно, на точность измерений, диод $Л_1$ монтируется в одном корпусе с обмотками датчика.

Конструкция датчика индуктивного толщиномера приведена на рис. 39. Каркас воспринимающей обмотки *1* устанавливается внутри каркаса обмотки возбуждения *4* (каркасы выполняются из текстолита или какого-либо другого изоляционного материала). На каркасах тщательно наматываются эмалированным проводом обмотки *2* и *3*. Каркас *4* крепится винтами к латунному корпусу датчика. В верхней части корпуса монтируются некоторые детали, относящиеся к выпрямителю. Датчик соединяется с измерительной схемой экранированным кабелем длиной 1—2 *м*.

ЕМКОСТНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ТОЛЩИНЫ

В ряде практически важных случаев необходимо измерять толщину покрытия одного диэлектрика другим. Так, при производстве кинопленки контролируется толщина слоя фотоэмульсии, нанесенного на ленту из целлюлозы. Трудности измерений в этом случае усугубляются тем, что толщина вдоль ленты может существенно изменяться.

Схема прибора, дающего возможность непрерывно измерять толщину диэлектрического покрытия на непроводящей ленте, приведена на рис. 40. Схема содержит два иден-

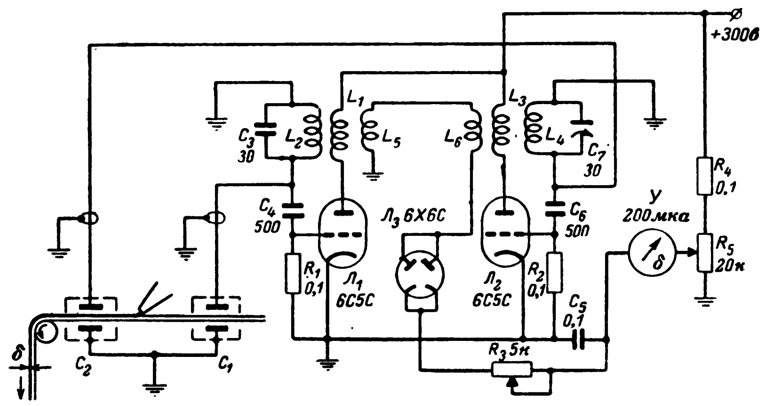


Рис. 40. Схема емкостного толщиномера.

Данные обмоток: L_1, L_3 — 40 витков ПЭЛ 0,3, диаметр каркаса 30 *мм*; L_2, L_4 — 50 витков ПЭЛ 0,5, диаметр каркаса 40 *мм*; L_5, L_6 — 20 витков ПЭЛ 0,3, наматываются на каркасах соответственно L_1 и L_2.

тичных генератора на триодах $Л_1$ и $Л_2$. В сеточный контур первого генератора на лампе $Л_1$ подключен датчик C_1, а в контур второго генератора на лампе $Л_2$—датчик C_2. Генераторы синхронизированы за счет связи через обмотки L_5 и L_6, включенные встречно в общую измерительную цепь, в которую входят диод L_3 и указатель $У$.

При нахождении между электродами датчиков участков ленты одной и той же толщины частота обоих генераторов одинакова и ток синхронизации в измерительной цепи весьма мал. При нахождении же между электродами, например, датчика C_1 участка ленты с покрытием, а датчика C_2 — без покрытия, генераторы находятся в неодинаковых условиях и для синхронизации генераторов в измерительной цепи должен появиться ток. Последний тем больше, чем больше толщина покрытия. Таким образом, по откло-

нению стрелки указателя $У$, фиксирующего ток измерительной цепи, можно установить толщину покрытия.

Для компенсации начального тока в измерительной цепи при отсутствии на ленте покрытия с движка сопротивления R_5 снимается необходимое для этого напряжение. Рабочая частота генераторов в рассматриваемой схеме обычно около 3—5 *Мгц*.

Для исключения влияния на точность измерений изменения толщины ленты вдоль ее длины необходимо датчики ставить возможно ближе друг к другу. Заземленный внешний электрод датчика целесообразно выполнять в виде трубы прямоугольного сечения, внутри которой на изоляторах укрепляется второй (внутренний) электрод. Внешний электрод в такой конструкции служит одновременно экраном датчика.

ЕМКОСТНЫЙ УРОВНЕМЕР

Принцип действия и методика расчета характеристик емкостного датчика для измерения уровня жидкостей были приведены в гл. 2.

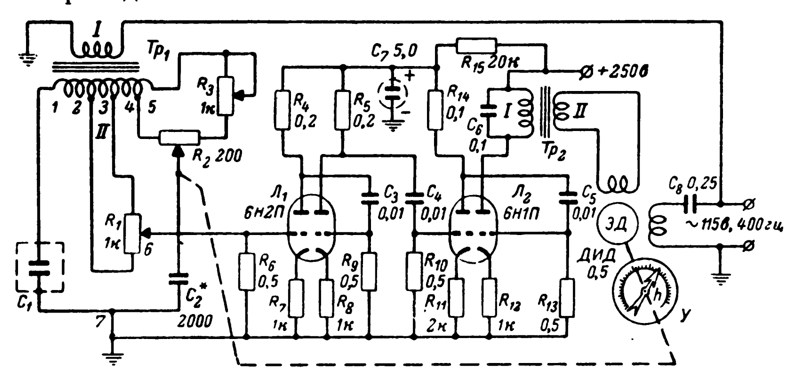


Рис. 41. Схема емкостного уровнемера.

Данные трансформаторов: $Тр_1$—пластины Ш-19, толщина пакета 29 *мм*, обмотка *I*—288 витков ПЭЛ 0,5, обмотка *II*—55 витков ПЭЛ 0,1 (отводы от 24-го, 33-го и 38-го витков); на сердечнике наматывается также накальная обмотка; $Тр_2$ — пластины Ш-16, толщина пакета 18 *мм*, обмотка *I* — 2 000 витков ПЭЛ 0,12, обмотка *II* — 450 витков ПЭЛ 0,15.

Ниже дается упрощенная схема емкостного уровнемера, нашедшего широкое применение (рис. 41). Она состоит из измерительного моста и следящей системы. Измерительный мост составляют датчик C_1, конденсатор C_2, рео-

хорд R_2, регулировочные сопротивления R_1 и R_3, а также участки вторичной обмотки *II* трансформатора $Тр_1$. В следящую систему входят усилитель, собранный на двойных триодах $Л_1$ и $Л_2$, и реверсивный электродвигатель *ЭД*, который через редуктор перемещает движок рехорда и одновременно вращает стрелку указателя *У*.

Перед измерениями регулировочными сопротивлениями устанавливаются начало отсчета и диапазон шкалы прибора. Для установки начала отсчета при отсутствии в датчике жидкости движок реохорда R_2 перемещается в левое крайнее положение, а движок сопротивления R_1 устанавливают в такое положение, чтобы сигнал на выходе усилителя отсутствовал. После этого датчик заполняется жидкостью до максимального уровня, и сопротивление R_3 изменяется до тех пор, пока движок реохорда не займет крайнее правое положение. Стрелка указателя, поворачиваясь одновременно с перемещением реохорда, должна занять положение, соответствующее измеряемому максимальному уровню.

После указанной установки шкалы отсчет уровня производится автоматически. Если емкость датчика C_1 при некотором уровне жидкости будет меньше или больше емкости конденсатора C_2, то измерительный мост разбалансируется и между точками *6* и *7* появится сигнал, который после усиления по напряжению и мощности каскадами на лампах $Л_1$ и $Л_2$ подается на управляющую обмотку реверсивного электродвигателя *ЭД*. В зависимости от фазы этого сигнала ротор двигателя вращается в ту или другую сторону и перемещает движок до тех пор, пока измерительный мост не будет уравновешен, т. е. сигнал на входе усилителя не уменьшится до нуля. Положение движка реохорда и связанной с ним стрелки указателя после уравновешивания моста характеризует контролируемый уровень.

Реверсивный электродвигатель, используемый в схеме, рассчитан на ток частотой 400 *гц*. Для упрощения схемы током этой частоты питаются не только обмотки указанного электродвигателя, но и измерительный мост. В связи с возможностью использовать в мостовой схеме датчик весьма большой емкости применение столь низкой частоты для питания этой схемы не приводит к большому увеличению внутреннего сопротивления датчика и связанным с этим отрицательным явлениям, отмеченным в гл. 1.

Датчик емкостного уровнемера обычно выполняется

в виде набора коаксиальных труб. Точность измерений рассматриваемым прибором составляет 2—3% максимального уровня, измеряемого датчиком.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ЕМКОСТНЫЙ МАНОМЕТР

Для измерения давления жидкостей и газов в последнее время нашли применение электронные манометры, в которых используются емкостные датчики для определения прогиба мембраны, на которую действует контролируемое давление. На рис. 42 приведена схема такого манометра,

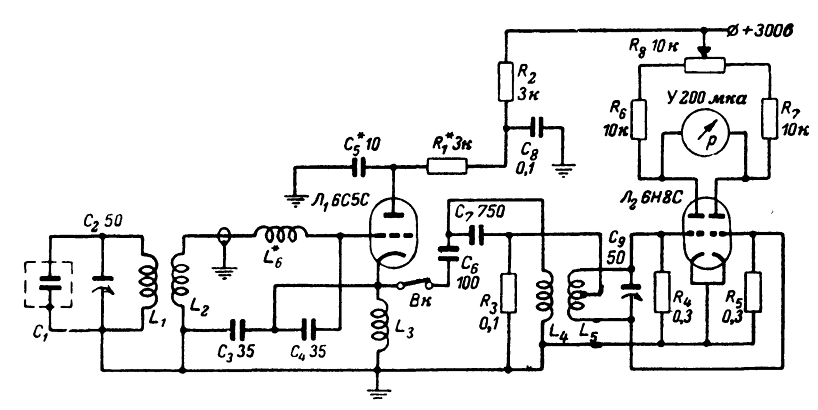


Рис. 42. Схема высокочастотного емкостного манометра.
Данные обмоток: L_1, L_2—16 витков ПЭЛ 1,5, диаметр каркаса 25 *мм*; L_4, L_5 (со средней точкой) — 16 витков ПЭЛ 1,5, каркас (общий) диаметром 40 *мм*; L_3 — 180 витков ПЭЛ 0,65, диаметр каркаса 40 *мм*.

пригодного для измерений как постоянных, так и переменных давлений.

В схеме используется частотная модуляция колебаний при изменении емкости датчика C_1, который связан с резонансной системой генератора посредством высокочастотного трансформатора L_1L_2. Выходное напряжение генератора, собранного на лампе $Л_1$, через конденсаторы C_6 и C_7 подается к фазовому дискриминатору, включающему высокочастотный трансформатор L_4L_5 и конденсатор C_9, настраивающий дискриминатор на начальную частоту генератора. При изменении его частоты относительно начальной с увеличением или уменьшением емкости датчика на сетки лампы $Л_2$, входящей в ламповый мост, подаются с выхода дискриминатора различные по амплитуде напряжения.

В результате этого после детектирования приложенных к сеткам напряжений в диагонали моста появляется ток, значение которого зависит от величины девиации частоты, а направление — от знака этой девиации. Ток диагонали моста фиксируется указателем *У*.

Генераторный каскад работает в режиме, который обусловливает значительную верхнюю и нижнюю отсечки амплитуды колебаний. Этим обеспечивается малое изменение выходного напряжения генерируемых колебаний при достаточной для измерений девиации частоты. Так, при девиации частоты на 100—150 *кгц* при начальной частоте 12 *Мгц* выходное напряжение генератора изменяется в весьма малых пределах, не ухудшающих практически точности измерений.

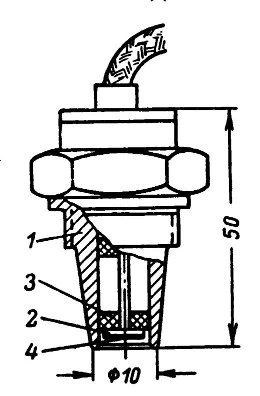


Рис. 43. Конструкция датчика высокочастотного емкостного манометра.

Для уравновешивания лампового моста используется переменное сопротивление R_8. Уравновешивание моста производится после разрыва выключателем *Вк* цепи, связывающей генератор с дискриминатором.

Рассмотренная измерительная схема позволяет использовать длинные провода, соединяющие датчик с прибором, за счет установки вблизи датчика согласующего трансформатора L_1L_2. Длина кабеля при использовании этого трансформатора может достигать 100 *м*.

Для увеличения стабильности работы схемы желательно анодные и накальные цепи прибора питать напряжением, стабилизированным с точностью 2—3%.

Конструкция датчика рассматриваемого манометра показана на рис. 43. Датчик представляет собой фигурный стальной стакан *1*, ввинчиваемый в резервуар, в котором контролируется давление. Дно стакана выполняется в виде стальной мембраны, толщина которой (обычно 1—2 *мм*) зависит от диапазона измеряемых давлений. На расстоянии 0,2—0,3 *мм* от мембраны внутри стакана устанавливается цилиндрическая металлическая пластинка *2*, укрепленная на изоляционной втулке *3*, притертой к внутренней поверхности стакана. На пластинку наклеивается тонкий листок слюды *4*.

При монтаже рассматриваемого прибора, как и других

высокочастотных приборов, необходимо обратить внимание на жесткость монтажа и шасси, целесообразное размещение деталей, исключающее возможность паразитных связей между ними, а также их повышенный нагрев. В частности, каркасы обмоток на шасси прибора должны отстоять друг от друга и стенок корпуса не меньше чем на 20—30 *мм*.

Точность измерений высокочастотным емкостным манометром достигает 1—2% измеряемого максимального давления.

ИНДУКТИВНЫЙ АНАЛИЗАТОР СОСТАВА

Для анализа состава жидких и твердых веществ по электропроводности может быть использована схема, приведенная на рис. 44.

Схема построена на принципе биений. Она включает измерительный генератор и смеситель на гептоде, опорный

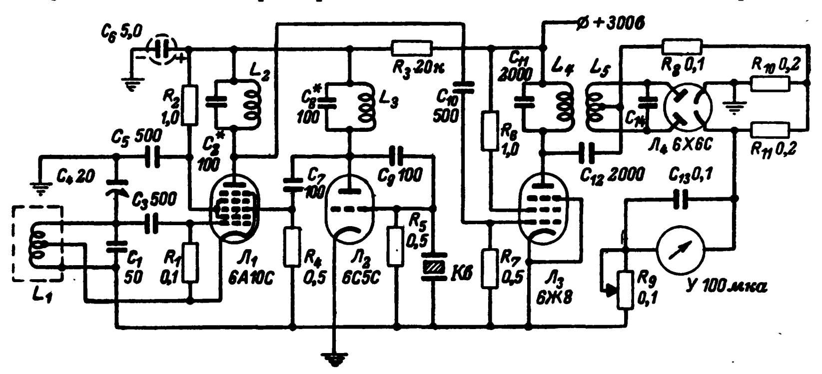


Рис. 44. Схема индуктивного анализатора состава.
Данные обмоток: L_1 — 10 витков ПЭЛ 2,0, диаметр каркаса 60 *мм*; L_2, L_3—20 витков ПЭЛ 1,0, диаметр каркаса 25 *мм*; L_4—40 витков ПЭЛ 0,7, диаметр каркаса 25 *мм*; L_5—2×80 витков ПЭЛ 0,5, наматывается на каркасе L_4.

генератор на триоде $Л_2$, ограничитель и усилитель на пентоде $Л_3$ и дискриминатор , в который входит диод $Л_4$.

Датчик L_1 включен в контур измерительного генератора, собранного на триоде, анодом которого является вторая сетка лампы $Л_1$. На третью сетку лампы $Л_1$ подается напряжение с выхода опорного генератора, стабилизированного кварцем *Кв*. Контур L_2C_2, включенный в анодную цепь смесительной лампы, настроен на частоту, равную

разности частот измерительного и опорного генераторов. Напряжение этой резонансной частоты выделяется на аноде лампы $Л_1$, с которого оно подается на сетку лампы $Л_3$. В сеточной цепи последней амплитуда напряжения ограничивается. Снимаемое с анодной нагрузки лампы $Л_3$ усиленное напряжение поступает на фазовый дискриминатор, настроенный на разностную частоту, которая соответствует нормальному составу контролируемого вещества. Так как дискриминатор настроен на эту частоту, то при нормальном заданном составе вещества ток в указателе равен нулю.

Если состав вещества, а вместе с ним и электропроводность его изменятся, то указанная разностная частота также изменится и стрелка указателя отклонится в соответствии с изменением частоты измерительного генератора, т. е. в зависимости от степени изменения состава вещества.

Частота опорного генератора выбирается порядка 10—15 *Мгц,* а разностная частота 400—500 *кгц.*

Рассмотренная схема может быть использована, разумеется, и для измерений с помощью емкостных датчиков. Для этого необходимо вместо конденсатора C_1 включить в приведенную схему используемый емкостный датчик.

ЕМКОСТНЫЙ ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬ

Емкостный виброизмеритель предназначен для измерения амплитуд и контроля формы вибраций крупных деталей, например жакетов и дисков турбин.

Схема прибора дана на рис. 45. Она включает емкостный датчик C_1, высокочастотный генератор, собранный на лампе $Л_1$, усилитель на лампе $Л_2$, дискриминатор, в который входит лампа $Л_3$, и регистрирующий прибор *РП*.

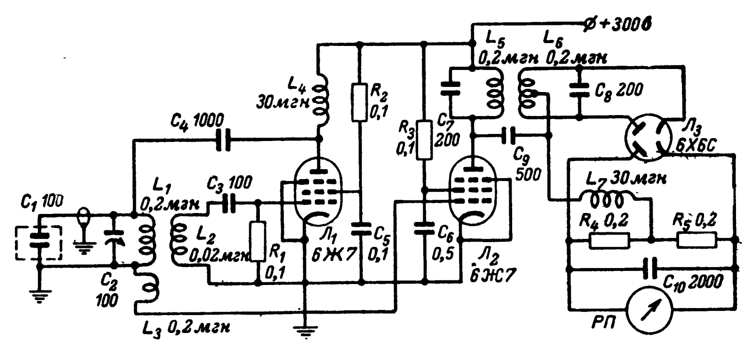


Рис. 45. Схема емкостного виброизмерителя.

Подвижные пластины емкостного датчика за счет усилия скрепленной с ними пружины прижимаются шариковой опорой к вибрирующей поверхности исследуемой детали. Вследствие этого емкость датчика C_1 изменяется соответственно перемещениям этой детали, а следовательно, с частотой и амплитудой контролируемых вибраций.

Емкость датчика C_1 подключена параллельно контуру L_2C_2 генератора. Поэтому при вибрациях частота генератора изменяется в зависимости от их амплитуды. Электродвижущая сила, снимаемая с обмотки L_3, индуктивно связанной с обмоткой L_1, подается на управляющую сетку лампы $Л_2$. В анодную цепь этой лампы включен контур дискриминатора L_5C_7, настроенный на номинальную частоту, которая соответствует частоте измерительного генератора при отсутствии колебаний контролируемой детали (400—500 *кгц*). На эту же частоту настроен контур L_6C_8. При указанной настройке контуров дискриминатора напряжение на его выходе отсутствует при номинальной частоте. В случае увеличения или уменьшения частоты генератора на выходе дискриминатора появляется напряжение постоянного тока, величина которого пропорциональна перемещению детали, а знак зависит от направления этого перемещения. Таким образом, напряжение на выходе дискриминатора, фиксируемое регистрирующим прибором, характеризует собой амплитуду и форму колебаний испытываемой детали.

Зависимость чувствительности прибора от частоты вибраций определяется в рассматриваемой схеме в основном постоянными времени цепей в выпрямителе дискриминатора, а также инерционностью регистрирующего прибора.

Датчик прибора представляет собой конденсатор, имеющий три внешние неподвижные пластины и две внутренние скрепленные подвижные пластины. Последние перемещаются относительно неподвижных пластин, изменяя рабочую площадь обкладок. При этом между пластинами сохраняется постоянный зазор.

Данная схема дает возможность осциллографировать с постоянной чувствительностью колебания с частотой до 1 000 *гц*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ограниченный объем брошюры не дает возможности рассмотреть большее число схем и конструкций радиоэлектронных приборов с использованием высокочастотных ем-

костных и индуктивных датчиков. Однако и приведенные примеры в достаточной степени могут характеризовать значительные возможности рассмотренных методов измерений для контроля как производственных процессов, так и различных физических и химических явлений.

Для более полной реализации этих возможностей необходимо при проектировании современных радиоэлектронных приборов с указанными высокочастотными датчиками особое внимание уделять выбору измерительных схем рассматриваемых приборов. Предпочтение следует отдавать таким схемам, которые обеспечивают максимальное исключение влияния нестабильности параметров их элементов, а также влияния внешних помех на точность измерений.

Некоторые используемые в настоящее время методы исключения влияния указанных причин на точность измерений были приведены выше в соответствующих главах. Отдельные, более сложные методы могут быть почерпнуты из специальной литературы, в частности, указанной в конце данной брошюры.

В связи с непрерывным совершенствованием схем и конструкций различных радиоэлектронных приборов в ближайшие годы следует ожидать еще более широкого внедрения в производственную и лабораторную практику также и радиоэлектронных приборов с высокочастотными емкостными и индуктивными датчиками.

ЛИТЕРАТУРА

Б. С. Сотсков, Основы расчета и проектирования элементов автоматических и телемеханических устройств, Госэнергоиздат, 1953.

А. М. Туричин, Электрические измерения неэлектрических величин, 3 изд., Госэнергоиздат, 1953.

Дж. Маркус, В. Целюф, Схемы промышленной электроники, ИЛ, 1959.

Дефектоскопия металлов, под ред. Д. С. Шрайбера, Оборонгиз, 1959.

Б. З. Михлин, Радиоэлектронные приборы для производственного контроля, Госэнергоиздат, 1956.

Д. И. Агейкин и др., Датчики систем автоматического контроля и регулирования, Машгиз, 1959.

В. Ш. Вигдерман, Емкостный измеритель давления с частотной модуляцией, «Приборы и стенды», ВНИИТИ, 1956.

Ю. М. Рабинович, Измеритель емкости, «Приборы и стенды», ВНИИТИ, 1958.

Г. Е. Песков, Е. Е. Фломина, Электроиные влагомеры, «Заводская лаборатория», 1958, № 9.

СОДЕРЖАНИЕ

Цена 1 р. 60 к.

(с 1/I 1961 г. цена 16 коп.)

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ СЛЕДУЮЩИЕ ВЫПУСКИ:

Г. И. Бялик, **Ламповые широкополосные усилители**, 109 стр., тираж 50 000 экз., ц. 2 р. 50 к., вып. 363.

Г. Б. Богатов, **Электролюминесценция и возможности ее применения**, 48 стр., тираж 30 000 экз., ц. 1 р. 15 к., вып. 364.

В. И. Пархоменко, **Магнитные головки**, 72 стр., тираж 35 000 экз., ц. 1 р. 65 к., вып. 365.

В. В. Яковлев, **Приемники на транзисторах**, 23 стр., тираж 75 000 экз., ц. 55 коп., вып. 366.

Г. Г. Костанди и В. В. Яковлев, **УКВ приемники для любительской связи** (2-е изд.), 32 стр., тираж 80 000 экз., ц. 75 коп., вып. 367.

Е. А. Левитин, **Электронные лампы**, 134 стр., тираж 150 000 экз., ц. 3 р. 05 к., вып. 368.

В. И. Хомич, **Приемные ферритовые антенны**, 64 стр., тираж 60 000 экз., ц. 1 р. 40 к., вып. 370.

В. Ю. Большов, **Экономичный приемник на транзисторах**, 32 стр., тираж 110 000 экз., ц. 75 коп., вып. 371.

С. К. Сотников, **Сверхдальний прием телевидения**, 96 стр., тираж 100 000 экз., ц. 2 р. 20 к., вып. 372.

В. Г. Лугвин, **Радиолюбительские конструкции транзисторных приемников**, 80 стр., тираж 100 000 экз., ц. 1 р. 85 к., вып. 373.

ПЕЧАТАЮТСЯ

Схемы сетевых радиолюбительских приемников, вып. 369.

Л. И. Куприянович, **Карманные радиостанции**, вып. 374.

Е. А. Детков, **Простой любительский магнитофон**, вып. 376.

Г. П. Самойлов, **Ремонт развертывающих устройств телевизоров**, вып. 377.

Госэнергоиздат заказов на книги не принимает и книг не высылает. Книги, выходящие массовым тиражом, высылают наложенным платежом без задатка отделения «Книга—почтой».

Заказы можно направлять: г. Москва, В-218, 5-я Черемушкинская, 14. Книжный магазин № 93 «Книга—почтой».

Рекомендуем заказывать литературу только по плану текущего года. Книги Массовой Радиобиблиотеки расходятся очень быстро, и поэтому выпуски прошлых лет давно уже все распроданы.

Высылку книг наложенным платежом производит также магазин Технической книги № 8 «Книга—почтой», Москва, Петровка, 15.